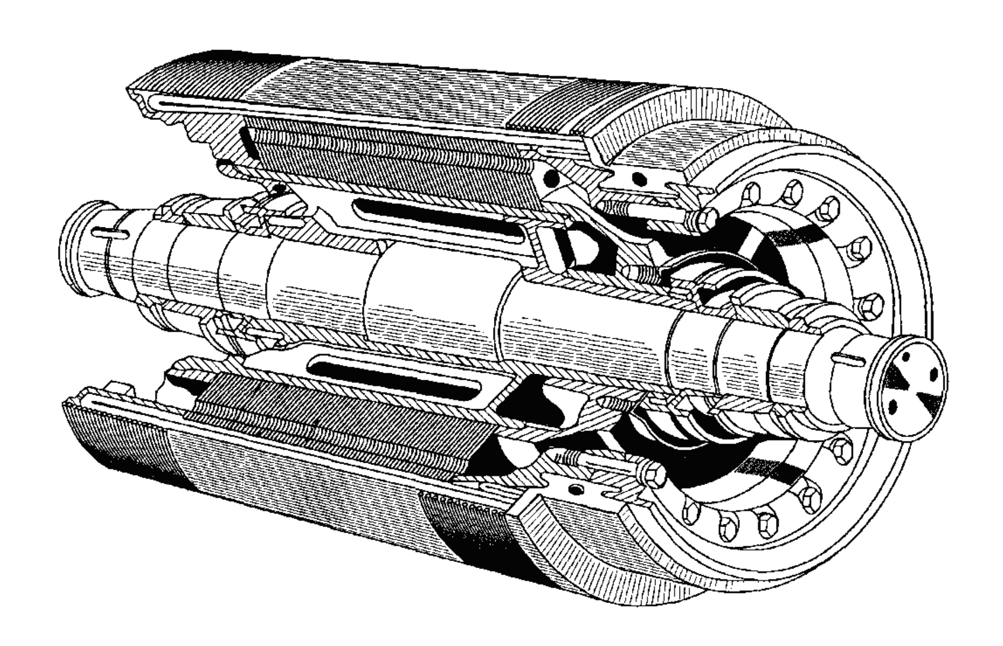
СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А. В. ГРИЩЕНКО, В. В. СТРЕКОПЫТОВ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
# И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Учебник



2005

Под редакцией доктора технических  наук, профессора А. В. Грищенко.
Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

Авторы:
доктор техн. наук, профессор А. В. Грищенко – введение, гл. 1, 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 15.
доктор техн. наук В. В. Стрекопытов – гл. 4, 5, 8, 9, 13, 14, 15.
Рецензенты:
преподаватель Московского колледжа железнодорожного транспорта С. И. Папченков;
преподаватель Санкт-Петербургского техникума железнодорожного транспорта
В. И. Бондаренко

Грищенко А. В.
Электрические машины и преобразователи подвижного состава.
Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов.
М. Издательский центр «Академия», 2005. – 320 с. 18ВИ 5-7695-2018-3
Рассмотрены устройство и принцип действия электрических машин постоянного и переменного тока, трансформаторов и аккумуляторов подвижного состава, а также схемотехника статических преобразователей. Описаны параметры конкретных электрических машин подвижного состава и их назначение. Для студентов учреждений среднего профессионального образования.
УДК 621.313(075.32) ББК31.261я723

# ВВЕДЕНИЕ.

Электрические машины, предназначенные для установки на подвижных объектах, должны удовлетворять ряду особых требований и работать в специфических условиях. Для электропривода объектов подвижного состава используются электрические машины с очень широким диапазоном мощностей (от нескольких десятков ватт до десятков мегаватт). Частота вращения привода транспортных электрических машин различного назначения находится в пределах 50 - 12000 об/мин. Быстроходность транспортных электрических машин определяется не только спецификой приводимых механизмов, но в значительной мере стремлением уменьшить размеры и массу, как самих электрических машин, так и приводимых ими механизмов. При заданных мощности $P_{\text{ном}}$ и частоте вращения $n_{\text{ном}}$ электрические машины должны иметь минимальные габариты, массу, нагрузку на ось, вписываться в габариты подвижного состава и обеспечивать высокую надежность. Электрические машины подвижного состава работают в тяжелейших условиях, резко отличающихся от условий работы стационарных машин. Поэтому необходимо учитывать следующие специфические особенности их эксплуатации.

1. Колебания температуры окружающей среды, как при работе, так и при бездействии машины могут составлять от -50 до +50 $^{\circ}$C при относительной влажности воздуха до 95 ± 3%. В таких условиях снижается механическая прочность отдельных деталей. При низких температурах изоляционные материалы в большинстве своем становятся хрупкими, в них появляются трещины. Летом (особенно в южных районах) работа электрических машин затруднена из-за ухудшения условий охлаждения, пересыхания изоляции, сильной запыленности. Повышенная влажность воздуха, особенно во время дождя или снега, вызывает коррозию металлических частей и снижает качество изоляции.

2. На корпус машины (особенно на тяговые двигатели) периодически, а иногда постоянно воздействуют импульсы ускорения, превышающие ускорение свободного падения в 10–20 раз. Динамические силы, действующие на детали электрических машин, могут привести к различным повреждениям: обрыву проводов и обмоток, особенно в местах пайки, появлению трещин и разрушению электрической изоляции, ускоренному износу осей и подшипников, нарушению нормальной работы упругих элементов. Конструкция машины и условия размещения ее на подвижном составе должны обеспечивать удобный доступ:

• к подшипникам скольжения с жидкой смазкой, где необходимо контролировать при автономной смазке достаточность подачи масла, а при принудительной смазке – наличие циркуляции масла через подшипники.

• подшипникам качения с консистентной смазкой для частичной замены и пополнения смазки без разборки подшипникового узла.

• щеточному аппарату коллекторов машин постоянного тока или контактным кольцам машин переменного тока.

• болтам, крепящим к станине главные и добавочные полюса машин постоянного тока.

• воздухоохладителям.

• коробкам выводов концов обмоток машин всех родов тока.

• к элементам, имеющим большую массу, для возможности использования при обслуживании и ремонте механизированных средств.

В ряде случаев машины устанавливаются и работают на подвижном составе в помещениях ограниченного объема, без циркуляции и обмена воздуха. Такие условия способствуют загрязнению машины угольной пылью щеток, нарушению коммутации и возможности переброса дуги с коллектора на корпус. Электрические машины, установленные снаружи кузова, при движении обдуваются встречным потоком воздуха, в котором содержатся частицы пыли, обладающие абразивным действием. Они разрушают изоляцию электрических машин, ухудшают работу подшипников и создают токопроводящие цепочки, которые могут вызывать короткие замыкания. Некоторые из перечисленных условий противоречат основным требованиям, предъявляемым к транспортным электрическим

машинам, например: для достижения возможно меньших габаритов активное ядро машины должно работать с высоким коэффициентом использования, что сопровождается высокими рабочими температурами, предельно допустимыми для теплостойкой изоляции. То же относится к механическим напряжениям в элементах конструкции, которые вследствие повышения быстроходности машины достигают высоких, а в ряде случаев предельно допустимых значений. Создание новых, более совершенных и более надежных машин, а так же их грамотная эксплуатация возможны только в результате глубокого изучения физических процессов, происходящих в работающих машинах аналогичного назначения. К таким процессам относятся изнашивание, релаксация и усталость металлов, коррозия и эрозия элементов конструкции в результате воздействия движущегося потока жидкости, старение масел и консистентных смазок, термическое старение электрической изоляции, запыление, длительное воздействие различных повторяющихся перегрузок, вибраций и т. п. Все эти процессы становятся заметными лишь после продолжительной работы машины, и достоверную информацию об износе может дать только систематическое изучение опыта эксплуатации оборудования, работающего в реальных условиях подвижных объектов. На подвижном составе все шире используются статические преобразователи энергии на базе полупроводниковых приборов. Силовая полупроводниковая техника является частью привода электрических машин подвижного состава, поэтому понимание работы этих систем необходимо и техникам-механикам. В системах управления силовыми полупроводниковыми преобразователями используются микропроцессоры. Изучение микропроцессорной техники не входит в объем подготовки специалистов-электромехаников, однако раздел, посвященный этим системам, включен в учебник для ознакомления.

# РАЗДЕЛ I.
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.
## Глава 1.
## УСТРОЙСТВО И РАБОТА КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

### 1.1. Преобразование энергии в электрических машинах.

Электрическая машина служит для преобразования:
• подводимой к ней механической энергии в электрическую.
• электрической энергии в механическую.
• электрической энергии в электрическую другого рода тока, другого напряжения или частоты.

Выработка электроэнергии на объектах подвижного состава осуществляется путем преобразования тепловой энергии, полученной при сжигании топлива в двигателе внутреннего сгорания, в механическую энергию вращения коленчатого вала, которая приводит в действие электрическую машину – генератор. Значительная часть потребляемой электрической энергии вновь преобразуется в механическую энергию, необходимую для приведения в действие различных машин, механизмов, станков и подвижного состава. Это преобразование осуществляется при помощи электрических машин, называемых электрическими двигателями. Главным назначением электрических машин является работа в качестве генераторов или двигателей. Для преобразования рода тока (например, переменного тока в постоянный и наоборот), напряжения, а также для усиления мощности электрических сигналов используются электромашинные преобразователи.

*Коллекторная машина* – электрическая машина (генератор, двигатель), у которой обмотка якоря (ротора) соединена с коллектором. Коллекторные машины предназначены, в основном, для работы на постоянном токе. Существуют универсальные коллекторные машины небольшой мощности, работающие как на постоянном, так и на переменном токе. При работе электрической машины в режиме генератора происходит преобразование механической энергии в электрическую, в соответствии с законом электромагнитной

индукции. Сущность этого закона состоит в следующем: если внешняя сила перемещает проводник в магнитном поле со скоростью у, например, слева направо перпендикулярно вектору магнитной индукции В, то в проводнике будет наводиться ЭДС (машина работает в режиме генератора):

$$E = Blv, \quad (1.1)$$

где $E$ – электродвижущая сила, индуцируемая в проводнике, В; В – магнитная индукция, Тл; $l$ – активная длина проводника, т.е. длина его части, находящейся непосредственно в магнитном поле, м. Формула (1.1) определяет лишь величину ЭДС. Для определения направления ЭДС существует известное из курса физики правило правой руки. Согласно этому правилу на рис. 1.1 ЭДС в проводнике направлена «от нас». Если концы проводника замкнуть на внешнее сопротивление (потребитель), то под действием ЭДС в проводнике потечет ток такого же направления. Если же по витку пропускать электрический ток $I$, магнитные поля 2 полюсов N и S и проводника 1 взаимодействуют между собой, вследствие чего возникает электромагнитная сила $F_{эм}$, действующая на проводник (машина работает в режиме двигателя):

$$F_{эм} = BlI \quad (1.2)$$

Направление силы $F_{эм}$ можно определить по правилу левой руки. В рассматриваемом случае эта сила направлена справа налево. Таким образом, в генераторе электромагнитная сила $F_{эм}$ является тормозящей по отношению к движущей силе $F$. При равномерном движении проводника эти силы уравновешивают друг друга, т.е. $F = F_{эм}$. Умножим обе части этого равенства на скорость движения проводника:

$$Fv = F_{эм}v \quad (1.3)$$

Подставив в формулу (1.3) выражение для $F_{эм}$ из формулы (1.2), получим:

$$Fv = BlIv = EI \quad (1.4)$$

Левая часть равенства ($Fv$) характеризует величину механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника в магнитном поле, а правая часть ($EI$) – величину электрической мощности, развиваемой в замкнутом контуре электрическим током $I$. Знак равенства между этими частями показывает, что в генераторе механическая мощность, затрачиваемая внешней силой, преобразуется в электрическую мощность.

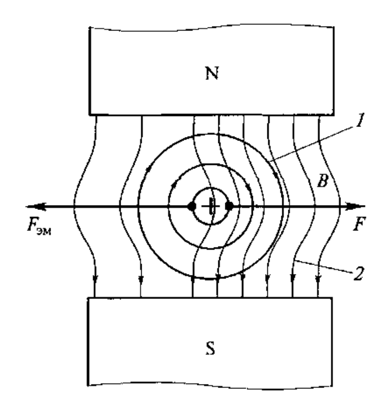



Рис. 1.1. Взаимодействие магнитных полей полюсов и проводника с током.
1 – магнитное поле проводника с током; 2 – основное магнитное поле.

Под действием силы $F_{эм}$ проводник перемещается в магнитном поле, и в нем индуцируется ЭДС $E$. Если к проводнику не прикладывать внешнюю силу $F$, а от источника электроэнергии подвести к нему напряжение $U$, то на проводник будет действовать только электромагнитная сила $F_{эм}$. Под действием этой силы проводник будет перемещаться в магнитном поле. При этом в проводнике индуцируется ЭДС, направленная противоположно приложенному к проводнику напряжению $U$. Таким образом, часть этого напряжения уравновешивается электродвижущей силой $E$, наведенной в этом проводнике, а другая часть определяет величину падения напряжения в проводнике:

$$U = E + Ir \quad (1.5)$$

где $r$ – электрическое сопротивление проводника, Ом. Для определения баланса мощностей

умножим обе части выражения (1.5) на ток $I$:

$$UI = El + I^2r. \quad (1.6)$$

Подставляя в правую часть равенства (1.6) вместо $E$ выражение для ЭДС из формулы (1.1), получим:

$$UI = BvlI + I^2r. \quad (1.7)$$

Поскольку согласно формуле (1.2) $Bil = F_{эм}$, то выражение (1.7) можно переписать как

$$UI = F_{эм}v + I^2r. \quad (1.8)$$

Из равенства (1.8) следует, что одна часть электрической мощности ($UI$), поступающей в проводник, преобразуется в механическую энергию ($F_{эм}v$), а другая идет на покрытие электрических потерь в проводнике ($I^2r$). Следовательно, проводник с током, помещенный в магнитное поле, можно рассматривать как элементарный электродвигатель. Рассмотренные процессы преобразования энергии дают возможность сделать весьма важный вывод: необходимым условием работы электрической машины является наличие проводников и магнитного поля. При этом преобразование энергии может происходить в любом направлении, т.е. электрическая машина может работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Такое свойство электрических машин постоянного тока называется *обратимостью*. Это свойство широко используется на локомотивах: тяговые генераторы работают в режиме электродвигателя при запуске дизеля, а тяговые электродвигатели – в режиме генератора при торможении.

## 1.2. Принцип действия электрической машины постоянного тока.

Рассмотрим работу простейшей машины постоянного тока коллекторного типа (рис. 1.2) в режиме генератора. Между двумя полюсами постоянного магнита (N и S) помещена вращающаяся часть машины – якорь, который приводится во вращение первичным двигателем, например турбиной или двигателем внутреннего сгорания. Якорь машины состоит из стального цилиндра, на котором расположена обмотка в виде витка *abcd*. Концы витка присоединены к двум пластинам (полукольцам), изолированным друг от друга. Эти пластины образуют важную часть машины – коллектор. К щеткам *A* и *B* присоединяется нагрузка генератора. В процессе работы машины коллектор вращается вместе с валом, а щетки *A* и *B* остаются неподвижными. Предположим, что якорь генератора вращается против часовой стрелки, тогда в проводниках обмотки якоря индуцируется ЭДС, направление которой указано на рисунке стрелками. Мгновенное значение этой ЭДС для одного проводника обмотки определяется по формуле:

$$e = Blv \quad (1.9)$$

Активная длина проводника $l$ в данном случае – величина неизменная, поэтому если скорость движения якоря в процессе работы генератора тоже остается неизменной, то в формуле (1.9) их произведение будет постоянной величиной (const). Это дает возможность записать формулу (1.9) в виде $e = constB$. Эта формула показывает, что величина и направление ЭДС в обмотке якоря определяются исключительно величиной и направлением магнитной индукции $B$ в воздушном зазоре между якорем и полюсами. При вращении якоря генератора проводники его обмотки поочередно занимают положения в магнитном поле с разными значениями магнитной индукции, поэтому в обмотке якоря генератора наводится переменная ЭДС. При этом график изменения ЭДС в зависимости от времени соответствует диаграмме распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Так, например, при синусоидальном характере распределения магнитной индукции в воздушном зазоре ЭДС, а следовательно, и ток в обмотке якоря также синусоидальный (рис. 1.3). Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи генератора был бы переменным. С помощью коллектора и щеток *A* и *B* переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток, т.е. ток, неизменный по направлению. При изображенном на рис. 1.2 положении витка *abcd* ток внешней цепи генератора направлен от щетки *A* к щетке *B*. Руководствуясь тем, что во внешней части цепи ток направлен от положительного зажима к отрицательному, определяем полярность щеток: щетка *A* имеет полярность « + », а щетка *B* – « - ».

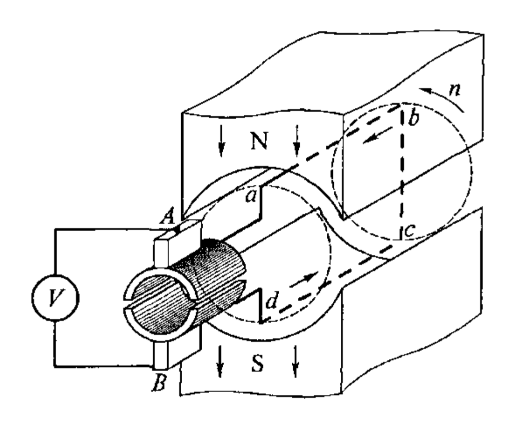



Рис. 1.2. Простейшая машина постоянного тока коллекторного типа:
*n* – частота вращения якоря

После того как якорь повернется на угол α = 180 °, направление тока в витке *abcd* изменится на обратное. Однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней части цепи остаются неизменными. Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щетками *A* всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под полюсом N, а под щеткой *B* – пластина, соединенная с проводником, расположенным над полюсом S. Благодаря этому ток во внешней цепи генератора имеет постоянное направление, а его величина остается переменной: когда проводники обмотки *abcd* находятся под серединой полюсов, ток имеет максимальное значение, а когда на геометрической нейтрали – ток равен нулю. Таким образом, с помощью коллектора в генераторе постоянного тока происходит преобразование переменного тока в обмотке якоря в пульсирующий ток во внешнем участке цепи.

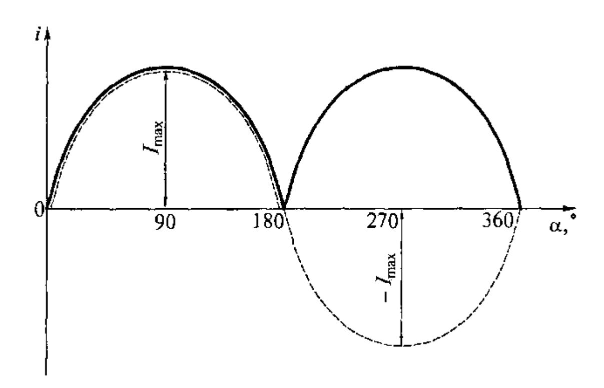



Рис. 1.3. Изменение направления тока в проводнике якоря, имеющего один виток обмотки.
━ изменение тока генератора, ---- изменение тока в проводнике якоря.

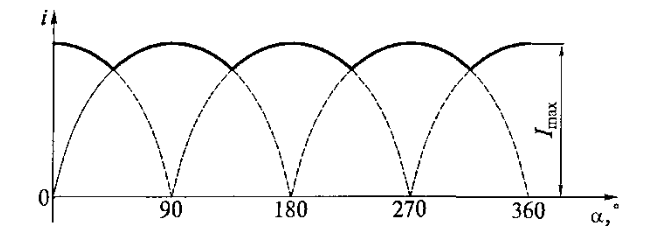



Рис. 1.4. График выпрямленного тока генератора, якорь которого имеет два витка.

Пульсации тока во внешней цепи генератора можно уменьшить, если выполнить обмотку якоря из нескольких витков, каждый из которых присоединен к соответствующей паре

коллекторных пластин. Так, например, если якорь имеет всего два витка, сдвинутых в пространстве под углом 90°, пульсации тока заметно уменьшаются (рис. 1.4). При большем числе витков в обмотке якоря пульсации становятся еще меньше. Практически уже при 16 витках в обмотке (и соответственно 16 пластинах в коллекторе) пульсации тока становятся незаметными и ток во внешней цепи (в нагрузке) генератора можно считать постоянным не только по направлению, но и по величине. В связи с этим современные коллекторные машины постоянного тока обычно имеют большое число коллекторных пластин и секций обмотки на якоре.

## 1.3. Устройство электрической машины постоянного тока.

Электрическая машина постоянного тока конструктивно состоит из двух частей: магнитной системы, создающей магнитное поле, и вращающегося в подшипниках якоря с обмоткой 9 и коллектором 1 (рис. 1.5). Эти части разделены воздушным зазором. Магнитное поле в электрических машинах постоянного тока создается обмотками возбуждения 5, расположенными на сердечниках полюсов 4 и питаемыми постоянным током. Число полюсов выбирается в зависимости от мощности и назначения электрической машины для подвижного состава и может колебаться от двух до двенадцати. Обычно магнитную систему выполняют в виде сплошной стальной станины 6 со съемными шихтованными сердечниками 4. Рассмотрим конструкцию отдельных узлов машины постоянного тока.

**Станина.** В машинах постоянного тока станина в первую очередь служит магнитопроводом для магнитного потока главных и добавочных полюсов. Кроме того, на ней крепятся полюса и подшипниковые щиты. Поэтому конструкция станины машин постоянного тока может быть литой из стали, сварной из толстолистовой или шихтованной из электротехнической стали. Станина должна обладать достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. Толщина стенки станины выбирается такой, чтобы обеспечить необходимую величину магнитной индукции, и должна составлять не менее половины поперечного сечения главных полюсов. Внутренний диаметр станины определяется с учетом необходимости для размещения якоря, главных и добавочных полюсов и их обмоток. В станинах из стального литья, например, у тяговых электродвигателей локомотивов, для которых важную роль играет уменьшение массы, поперечное сечение может быть уменьшено по осям главных полюсов, так как магнитный поток, переходящий с главного полюса на станину, равномерно распределяется по всей ширине полюса. Для машин постоянного тока с высокими динамическими нагрузками магнитной цепи, например при питании от статических преобразователей, высоких скоростях нарастания тока якоря, а также при быстром нарастании тока возбуждения, необходимо при изготовлении станины использовать шихтованные листы из электротехнической стали. Часть станины, образующая коллекторное пространство и не являющаяся магнитопроводом, имеет относительно небольшую толщину стенки, необходимую для обеспечения механической прочности. Иногда эта часть электрической машины выполняется в виде отдельных ребер, закрытых тонкостенными кожухами. Внутренний диаметр станины определяется с учетом необходимости для размещения якоря, главных и добавочных полюсов и их обмоток. В станинах из стального литья, например, у тяговых электродвигателей локомотивов, для которых важную роль играет уменьшение массы, поперечное сечение может быть уменьшено по осям главных полюсов, так как магнитный поток, переходящий с главного полюса на станину, равномерно распределяется по всей ширине полюса. Для машин постоянного тока с высокими динамическими нагрузками магнитной цепи, например при питании от статических преобразователей, высоких скоростях нарастания тока якоря, а также при быстром нарастании тока возбуждения, необходимо при изготовлении станины использовать шихтованные листы из электротехнической стали.

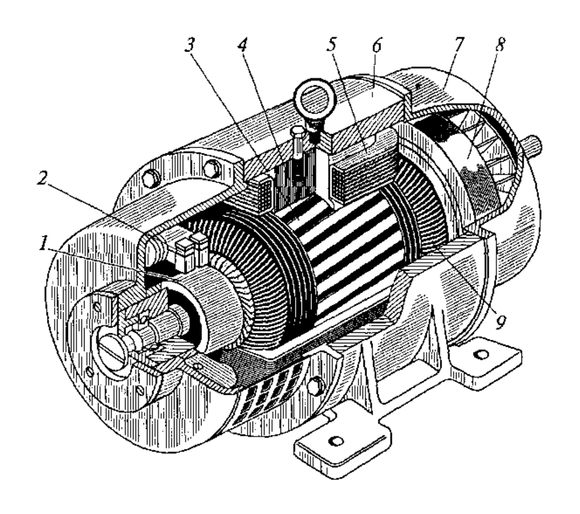



Рис. 1.5. Общий вид машины постоянного тока.
1 – коллектор; 2 – щетка; 3 – сердечник якоря; 4 – сердечник главного полюса;
5 – обмотка возбуждения; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит;
8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря.

Часть станины, образующая коллекторное пространство и не являющаяся магнитопроводом, имеет относительно небольшую толщину стенки, необходимую для обеспечения механической прочности. Иногда эта часть электрической машины выполняется в виде отдельных ребер, закрытых тонкостенными кожухами.

**Главные полюса.** Магнитное поле в машине постоянного тока создается магнитодвижущей силой (МДС) обмотки возбуждения, которая выполняется в виде катушек 3, надетых на сердечники 2 главных полюсов (рис. 1.6). Со стороны, обращенной к якорю, сердечник заканчивается полюсным наконечником (башмаком) 4, посредством которого обеспечивается равномерное распределение магнитного потока по поверхности якоря. Для снижения потерь башмаки шихтуются из электротехнической стали, а сердечники выполняются монолитными. Однако на практике, как правило, не используют составную конструкцию в виде полюсного сердечника 2 и полюсного башмака 4 и шихтуют главный полюс целиком. Такая конструкция обеспечивает уменьшение вихревых токов в сердечнике полюса, возникающих в результате пульсации магнитной индукции в полюсных наконечниках из-за зубчатой поверхности якоря. Шихтованный из лакированных листов стали полюс прессуется под давлением 200 кПа. Листы стягиваются пропущенными через сердечник болтами или специальными заклепками с нажимными щеками. Болты или заклепки должны распределяться в полюсе как можно более равномерно и выдерживать упругую реакцию сжатого полюса. Нажимные щеки, в которых размещаются головки заклепок или болтов, изготовляются из отожженных стальных листов толщиной 8...20 мм в зависимости от поперечного сечения и длины полюса.

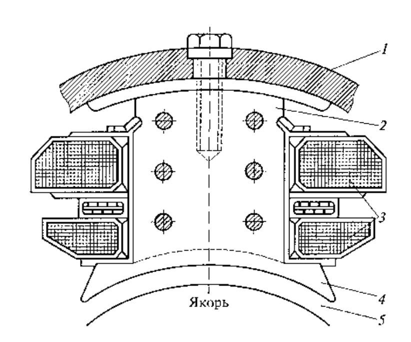



Рис. 1.6. Главный полюс машины постоянного тока:
1 – станина; 2 – сердечник полюса; 3 – катушки обмотки возбуждения;
4 – полюсный башмак; 5 – воздушный зазор

В компенсированных машинах постоянного тока (тепловые генераторы) в полюсных башмаках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки, поэтому башмаки в этих машинах имеют большие размеры, чем в компенсированных машинах. Полюса крепятся к станине болтами или шпильками. Полюсные катушки выполняются из медного провода, намотанного на каркас из изолирующего материала. Иногда катушку делят по высоте на несколько частей, между которыми оставляют вентиляционные каналы. Такая конструкция обеспечивает лучшее охлаждение катушки.

**Добавочные полюса.** Практически на всех машинах постоянного тока мощностью свыше 1 кВт с целью уменьшения искрения на щетках устанавливаются добавочные полюса. Добавочный полюс (рис. 1.7) состоит из сердечника 1 и катушки 2, выполненной из медного изолированного провода с сечением, рассчитанным на рабочий ток машины, так как катушка этого полюса включается последовательно с обмоткой якоря. Сердечник добавочного полюса изготовляется из стали и имеет монолитную конструкцию, поскольку из-за малой величины магнитной индукции в сердечнике практически не индуцируются вихревые токи. Добавочные полюса устанавливают посередине между главными полюсами и крепят к станине болтами. Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Для его регулирования применяются регулировочные пластины из магнитного или немагнитного материала. Окончательная величина воздушного зазора устанавливается при настройке коммутации электрической машины путем построения предельных кривых зоны безыскровой коммутации. Как правило, в машинах большой мощности воздушный зазор под добавочным полюсом разделяется на две части: сердечник – станина и сердечник – якорь.

Рис. 1.7. Добавочный полюс машины постоянного тока.
1 – сердечник, 2 – катушка.

**Якорь.** В машинах постоянного тока якорь состоит из вала, сердечника, обмотки и коллектора. Сердечник якоря имеет форму цилиндра. При изготовлении сердечника используют штампованные листы из электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы изолируют при помощи лака или бумаги. Собранный сердечник удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами. Такая конструкция сердечника якоря дает возможность уменьшить в нем потери энергии от действия вихревых токов, возникающих в результате перемагничивания сердечника при вращении якоря в магнитном поле. Для охлаждения машины в сердечниках якоря выполнены вентиляционные каналы. На поверхности сердечника имеются продольные пазы, в которые укладывается обмотка якоря. *Обмотку* якоря выполняют из медного провода круглого или прямоугольного сечения и укладывают в пазах сердечника якоря, тщательно изолируя от сердечника. Обмотка якоря состоит из секций, концы которых припаиваются к пластинам коллектора. Для прочного закрепления проводов обмотки в пазах сердечника якоря применяются деревянные, гетинаксовые или текстолитовые клинья. Однако деревянные клинья не обеспечивают надежного крепления, так как при высыхании они уменьшаются в размерах и могут выпасть из паза. В машинах малой мощности пазы не закрывают, а прикрывают сверху бандажом. Для того чтобы бандаж не выступал за пределы якоря, диаметр углубления под бандаж должен быть меньше диаметра якоря. Бандаж выполняют из стальной проволоки или стеклоткани, наматываемой непосредственно на лобовые части обмотки.

*Коллектор* состоит из активной части и крепежной конструкции (рис. 1.8). Коллекторные пластины 7 выполняют из холоднокатаной (коллекторной) меди и изолируют друг от друга прокладками из коллекторного миканита – смеси чешуек слюды и шеллака в качестве связующего компонента (около 5%). При повышенных механических и термических требованиях коллекторные пластины изготавливают из меди с добавкой серебра (около 0,1) или циркония (около 0,06). Оба сплава имеют высокую электропроводность и повышенный предел текучести при повышенной температуре при стабильном пределе прочности на растяжение. К выступающей части коллекторной пластины (петушок 5) припаивают провода обмотки якоря.

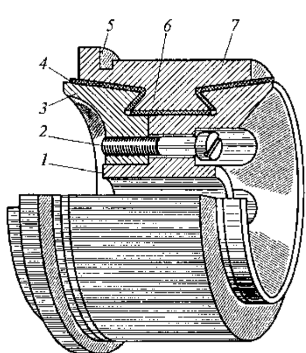



Рис. 1.8. Общий вид коллектора машины постоянного тока.
1 – корпус; 2 – стяжной болт; 3 – нажимное кольцо; 4 – изоляция; 5 – петушок;
6 – нижний край пластины; 7 – пластина.

Нижний край пластины 7 выполнен в виде «ласточкина хвоста». После сборки коллектора край 6 оказывается зажатым между двумя нажимными кольцами 3, изолированными от коллекторных пластин миканитовыми конусами и цилиндрами. Чтобы миканитовые прокладки при изнашивании пластин коллектора не выступали над пластинами, изоляция должна быть утоплена на глубину до 1,5 мм от поверхности скольжения коллектора в радиальном направлении. Благодаря этому уменьшается опасность возникновения кругового огня при электрическом перекрытии от пластины к пластине и, кроме того, устраняется трение мягких угольных щеток о миканит. В зависимости от положения поверхности скольжения щеток различают две основные группы коллекторов: дисковые и цилиндрические. У *дискового* коллектора поверхность скольжения находится в плоскости, перпендикулярной оси. У *цилиндрического* (барабанного) коллектора поверхность скольжения параллельна оси. Чаще всего в настоящее время применяются цилиндрические коллекторы. В зависимости от способа крепления коллекторных пластин различают две группы цилиндрических коллекторов:

• коллектор, медные пластины которого запрессовываются в пластмассу. Пластмасса в этом случае является скрепляющим и изолирующим материалом. Такая конструкция коллектора проста в изготовлении, но может применяться лишь для машин малой мощности и при частоте вращения до 10000 об/мин;

• коллектор арочной конструкции. Торцовые поверхности коллектора, имеющие форму «ласточкина хвоста», зажимаются при помощи V-образных нажимных колец так, что на наклонную часть поверхности коллекторных пластин действует нормальное давление. В этом случае между внутренней поверхностью выточки коллекторных пластин и наружным диаметром нажимных колец обязательно должен быть зазор. Пластины коллектора изолируют от нажимных колец специальными прокладками. Для соединения коллекторных пластин с обмоткой якоря при небольшой разнице диаметров якоря и коллектора коллекторные пластины удлиняют вверх, до достижения диаметра якоря (гребенчатый коллектор). У малых электрических машин с обмоткой из проводников круглого сечения концы проводников обычно закладываются непосредственно в выфрезерованные в коллекторной пластине пазы. Пайка производится методом погружения, а затем коллектор

обтачивается. Однако в большинстве случаев, в особенности при существенной разнице диаметров якоря и коллектора, пластины соединяются с обмоткой якоря посредством так называемых петушков. В пластинах со стороны якоря перед сборкой коллектора выфрезеровывают прорези (шлицы). Коллекторные петушки впаиваются в эти шлицы с помощью мягкого припоя. Петушки изготовляют из полосовой меди толщиной от 0,5 до 1,5 мм и лудят. Соединение с концами обмоток производится с помощью стяжных скоб.

**Щеточное устройство.** Электрический контакт с поверхностью коллектора в машине постоянного тока осуществляется с помощью щеток. Они устанавливаются в щеточном устройстве, которое состоит из щеточной траверсы, пальцев и щеткодержателей. Щеткодержатели крепятся непосредственно или через зажимные элементы на щеточных болтах изолированно, или же монтируются без изоляции непосредственно на щеточных бракетах (кронштейнах) или щеточных траверсах, которые изолированы относительно корпуса. Щеткодержатели вместе с траверсами выполняют следующие функции:

• удерживают щетки в установленном радиальном или наклонном, а также аксиальном и окружном направлениях, обеспечивая свободное перемещение щеток без перекоса при работе и по мере их износа;

• обеспечивают требуемое давление на щетки, которое должно быть по возможности постоянным во всем диапазоне допустимого износа щеток. Это осуществляется благодаря применению специальной кинематической схемы щеткодержателя или регулированием давления вручную. Чрезмерное давление может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточное – искрение на коллекторе;

• передают ток щеток (раздельно для положительных и отрицательных щеток) в якорную цепь или из нее.

Во избежание замыкания щеткодержатели должны быть изолированы от корпуса электрической машины. Для уменьшения вибрации щеткодержатель должен иметь достаточную жесткость. Щетки каждой полярности должны иметь поперечное сечение не более 1000 мм$^2$. Это означает, что при допустимой плотности тока 0,1 А/мм$^2$ одна щетка может выдерживать максимальный ток 100 А. При необходимости увеличения общего тока устанавливают несколько щеток. Причем действует правило, что на один щеточный бракет допускается максимальный ток 1000 А. В машинах постоянного тока размеры и положение щеткодержателей по окружности коллектора определяют допустимым щеточным перекрытием (отношением длины дуги одновременно перекрываемых щеткой коллекторных пластин к длине коллекторного деления). Название «щетка» возникло в начальный период практической электротехники, когда первые устройства этого рода действительно были щетками или кисточками. Они состояли из собранных в пучок медных проволок, которые свободным концом скользили по коллектору или контактным кольцам. В настоящее время такое наименование уже не соответствует действительности, но оно прочно вошло в международную техническую терминологию. Термин «угольные щетки» применяют не только к щеткам, состоящим исключительно из угля, но и к щеткам, содержащим большее или меньшее количество медного порошка (см. Приложение). Следует учитывать, что угольные щетки имеют отрицательный температурный коэффициент, т. е. их электропроводность увеличивается с повышением температуры. Поэтому необходимо, чтобы на одной машине применялись только щетки с одинаковой электропроводностью. В противном случае, возможно, что одна из более горячих щеток будет проводить больше тока, чем другие, и нагреется вследствие этого еще больше. В результате произойдет дальнейшее нарушение распределения тока между параллельно включенными щетками. Помимо рассмотренных узлов в конструкцию машины входят два подшипниковых щита: передний (со стороны коллектора) и задний. Щит с помощью болтов крепится к станине. В центральной части щита имеется расточка под подшипник. Обычно в машинах применяются шариковые или роликовые подшипники качения. Лишь в некоторых машинах с целью обеспечения бесшумности применяют подшипники скольжения. Подвод и снятие напряжения с электрических машин, а также подвод тока к обмоткам возбуждения

осуществляется через специальные зажимы. Эти зажимы закреплены на планках или клеммных коробках, расположенных на станине, а в некоторых машинах на переднем подшипниковом щите. Выводы обмоток машин постоянного тока обозначаются по ГОСТ 26772 – 85 следующим образом:

| | |
|---|---|
| Обмотка якоря | Я1 и Я2 |
| Обмотка добавочных полюсов | Д1 и Д2 |
| Обмотка компенсационная | К1 и К2 |
| Обмотка возбуждения параллельная (шунтовая) | Ш1 и Ш2 |
| Обмотка возбуждения последовательная (сериесная) | С1 и С2 |

Цифрой 1 обозначаются начала обмоток, а цифрой 2 – концы.

### 1.4. Обмотки машины постоянного тока

Итак, для работы коллекторной машины постоянного тока необходимо наличие в ней двух обмоток: обмотки возбуждения и обмотки якоря. Первая служит для создания в машине магнитного поля, т. е. для возбуждения. В якорной обмотке индуцируется ЭДС, под действием которой возникает электрический ток и, как следствие, электромагнитный момент. Обмотка состоит из соединенных между собой витков. Каждый виток имеет две активные стороны 1 и 3 и лобовую часть 2 (рис. 1.9). Исключение составляют магнитоэлектрические машины постоянного тока, в которых имеется лишь одна (якорная) обмотка, так как магнитное поле (возбуждение) в этих машинах создается постоянными магнитами. Таким образом, *обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.* Простейшей частью обмотки является *секция* – два проводника, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном полюсному шагу или незначительно отличающемся от него, и присоединяемых к двум коллекторным пластинам. Суммарная ЭДС секции будет наибольшей, если ЭДС активных сторон равны по величине и сдвинуты по фазе на 180 эл. град. В этом случае при обходе секции ЭДС складываются арифметически. В лобовых частях секции ЭДС не индуцируется. Это происходит, когда ширина (шаг) секции по пазам якоря равна полюсному делению τ. Такую обмотку называют диаметральной. Часть поверхности якоря, приходящуюся на один полюс, называют полюсным делением и определяют по формуле:

$$\tau = \pi \times D / 2p \quad (1.10)$$

где τ – полюсное деление, м; D – диаметр якоря, м; $2p$ – число главных полюсов в машине. Секции укладываются в пазах сердечника якоря в два слоя, при этом если одна из активных сторон секции находится в нижней части одного паза, то ее другая сторона находится в верхней части другого паза. Верхняя активная сторона одной секции и нижняя активная сторона другой, уложенные в одном пазу, образуют элементарный паз ($Z_э$). В реальном пазу может быть и более двух активных сторон, например четыре, шесть, восемь и т. д. В этом случае считается, что реальный паз состоит из нескольких элементарных пазов.

Так как секция имеет две активные стороны, то каждой секции соответствует один элементарный паз. Концы секции присоединяются к коллекторным пластинам, при этом к каждой пластине присоединяются конец одной секции и начало следующей, т. е. на каждую секцию приходится одна коллекторная пластина. Таким образом, для якорной обмотки можно записать следующее равенство:

$$S = Z_э = K \quad (1.11)$$

где S – число секций в обмотке якоря; $Z_э$ – число элементарных пазов; К – число коллекторных пластин.

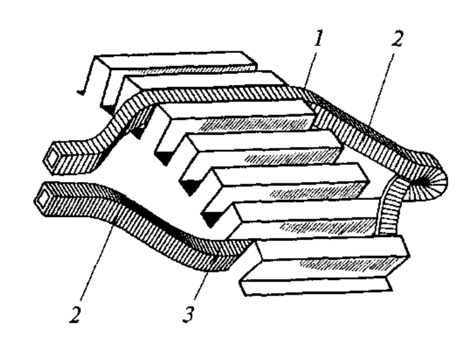



Рис. 1.9. Виток якорной обмотки.
1, 3 – активные стороны обмотки; 2 – лобовая часть.

В зависимости от формы секций и способа присоединения их к коллектору различают следующие типы якорных обмоток:
- простая петлевая;
- сложная петлевая;
- простая волновая;
- сложная волновая;
- комбинированная (лягушечья).

### 1.4.1. Простая петлевая обмотка.

При изготовлении петлевой обмотки сначала последовательно соединяют секции, расположенные под одним полюсом, а затем соединяют секции, расположенные под следующим полюсом, и т. д. В простой петлевой обмотке якоря каждая секция присоединяется к двум рядом лежащим коллекторным пластинам. При укладке секций на сердечник якоря начало каждой последующей секции соединяют с концом предыдущей, постепенно перемещаясь при этом по поверхности якоря (и коллектора) так, что за один обход укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции оказывается соединенным с началом первой, т. е. обмотка замыкается. На рис. 1.10 изображены две секции простой петлевой обмотки и обозначены шаги обмотки. Шаг обмотки – это расстояние между двумя активными сторонами секций, выражаемое числом находящихся между ними элементарных пазов. Реальный паз может состоять из одного или нескольких элементарных пазов, т.е. по ширине паза может располагаться одна или несколько сторон секций. Кратчайшее расстояние между активными сторонами первой секции на поверхности якоря называют первым частичным шагом обмотки по якорю ух. Это расстояние измеряется в элементарных пазах и, как было указано ранее, должно быть равно или незначительно отличаться от полюсного деления. Расстояние между активной стороной нижнего слоя второй секции и активной стороной верхнего слоя первой секции называют вторым частичным шагом обмотки по якорю $y_2$ и измеряют в элементарных пазах. Знание шагов обмотки $y_1$ и $y_2$ дает возможность определить результирующий шаг обмотки по якорю y, который представляет собой расстояние между расположенными в одном слое активными сторонами двух следующих друг за другом секций, т. е. $y = y_1 - y_2$.
$y_1$ к $y_2$ – первый и второй частичные шаги обмотки по якорю; $y_к$ – шаг обмотки по коллектору; y – результирующий шаг обмотки по якорю; К – коллектор. Укладывая секции обмотки, мы перемещаемся не только по сердечнику якоря, но и по коллектору. Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец одной секции, называют шагом обмотки по коллектору $y_к$. Как следует из определения, начало и конец каждой секции простой петлевой обмотки присоединяются к рядом лежащим коллекторным пластинам, следовательно:

$$y = y_к = \pm 1 \quad (1.12)$$

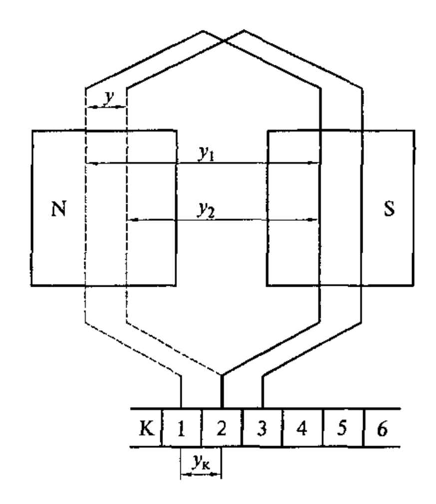



Рис. 1.10. Секции простой петлевой обмотки.

В выражении (1.12) знак «+» соответствует правоходовой обмотке, а знак «-» – левоходовой. Для определения всех шагов простой петлевой обмотки достаточно рассчитать первый частичный шаг по якорю:

$$y_1 = Z_э / 2p \pm \varepsilon \quad (1.13)$$

где ε – величина, меньшая единицы, используемая для получения $y_1$, выраженного целым числом. На основании формулы (1.12) определяем второй частичный шаг обмотки:

$$y_2 = y_1 \pm y = y_1 \pm 1 \quad (1.14)$$

Прежде чем приступить к построению развернутой схемы обмотки (рис. 1.11), необходимо отметить следующее:

• все пазы сердечника якоря и секции обмотки нумеруются. При этом номер секции определяется номером паза, в верхней части которого находится одна из ее активных сторон;

• активные стороны верхнего слоя изображают на схеме сплошными линиями, а стороны нижнего слоя – пунктирными так, что одна половина секции, относящаяся к верхнему слою, показывается на схеме сплошной линией, а другая, относящаяся к нижнему слою, – пунктирной. На листе бумаги размечают пазы и наносят контуры полюсов. При этом следует учесть, что изображенный на схеме полюс представляет собой зеркальное отражение полюса, находящегося над якорем. При выполнении схемы обмотки ширину полюса следует принять приблизительно равной 0,8τ. Полярность полюсов чередуется: N – S – N – S. Затем изображают коллекторные пластины и наносят на схему первую секцию, активные стороны которой расположены в пазах 1 и 4. Значение шага $y_1$ рассчитывают по формуле (1.13).

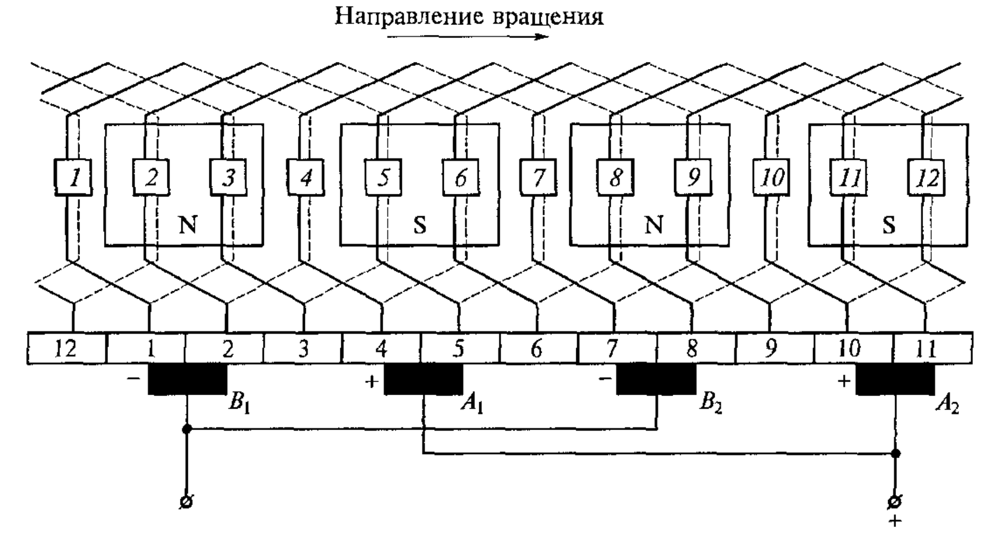



Рис. 1.11. Развернутая схема простой петлевой обмотки.

Коллекторные пластины, к которым присоединены концы первой секции, обозначают цифрами 1 и 2. Затем нумеруют остальные коллекторные пластины и последовательно наносят на схему другие секции (вторую, третью и т.д.). Последняя секция (двенадцатая) должна замкнуть обмотку, что будет свидетельствовать о правильно выполненной схеме. Далее на схеме изображают щетки. Расстояние между щетками, например $А_1$ и $Б_2$ должно соответствовать полюсному делению, т.е. должно составлять К/2$p$ коллекторных делений. Электрический контакт якорной обмотки с внешней цепью осуществляется через коллектор и щетки. Наибольшее значение ЭДС машины соответствует положению щеток на геометрической нейтрали. Но так как коллекторные пластины, к которым присоединены секции, смещены относительно активных сторон этих секций приблизительно на 1/2τ, то щетки следует располагать на коллекторе по оси главных полюсов машины. Предположим, что машина работает в режиме генератора и ее якорь вращается в направлении слева направо. Воспользовавшись правилом правой руки, определяем направление ЭДС (тока), индуцируемой в активных сторонах секций. Это дает нам возможность установить полярность щеток: щетки $А_1$ и $А_2$, от которых ток отводится во внешнюю цепь, являются положительными, а щетки $В_1$ и $В_2$ – отрицательными. Щетки одинаковой полярности соединяют параллельно и подключают к соответствующим выводам машины. При этом щетки положительной полярности чередуются со щетками отрицательной полярности. Схема простой петлевой обмотки состоит из четырех участков, каждый из которых образует параллельную ветвь обмотки и представляет собой несколько последовательно соединенных секций с одинаковым направлением тока. Затем приступают к обходу секций обмотки, начиная с первой секции. Далее идут вторая и третья секции, которые образуют одну параллельную ветвь, в то время как первая секция оказывается замкнутой накоротко щеткой $В_1$. Подобным образом обходят всю обмотку. В результате получается электрическая схема обмотки с четырьмя параллельными ветвями, где каждая параллельная ветвь содержит две последовательно включенные секции. Электродвижущие силы секций в пределах каждой параллельной ветви складываются. *Так как все ветви соединены параллельно, то ЭДС всей обмотки якоря определяется величиной ЭДС одной параллельной ветви, тогда как величина тока якорной обмотки равна сумме токов всех ветвей обмотки:*

$$I_я = 2a i_а \quad (1.15)$$

где $I_я$ – величина тока якорной обмотки, А; 2$a$– число параллельных ветвей обмотки; $i_а$ – величина тока одной параллельной ветви, А. Рассматриваемая обмотка якоря содержит четыре параллельные ветви, т.е. столько же, сколько главных полюсов в машине. Это совпадение не случайно, так как в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей всегда равно числу главных полюсов машины:

$$2a = 2p \quad (1.16)$$

Число параллельных ветвей в обмотке якоря влияет на основные рабочие параметры машины – напряжение и величину тока.

### 1.4.2. Сложная петлевая обмотка.

Итак, в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей равно числу главных полюсов машины. При необходимости получить обмотку с большим числом параллельных ветвей, например, как это требуется в низковольтных машинах с большими токовыми нагрузками, пришлось бы делать машину многополюсной, что обусловило бы увеличение ее размеров и стоимости. Хорошим решением в такой ситуации является применение сложной петлевой обмотки, которая сочетает в себе несколько простых обмоток (ходов), уложенных на один якорь. Число параллельных ветвей в сложной петлевой обмотке составляет:

$$2a = 2pm \quad (1.17)$$

где $m$ – коэффициент кратности, определяющий число простых петлевых обмоток, из которых составлена сложная обмотка. Ширина щеток в машине со сложной петлевой обмоткой принимается такой, чтобы каждая щетка одновременно перекрывала не менее $m$

коллекторных пластин, т.е. столько пластин, сколько простых обмоток содержится в сложной. В этом случае простые обмотки оказываются соединенными параллельно друг с другом. Для того чтобы щетка могла соединять эти обмотки параллельно, пришлось раздвинуть стороны секции и коллекторные пластины одной обмотки и разместить между ними стороны секции и коллекторные пластины другой обмотки. Поэтому шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг по якорю сложной обмотки по сравнению с этими же параметрами простой петлевой обмотки увеличился в *m* раз:

$$y_к = y = m. \quad (1.18)$$

Первый частичный шаг обмотки по якорю подсчитывается по формуле (1.13).

### 1.4.3. Простая волновая обмотка.

В волновых обмотках последовательно соединяются секции, начала которых расположены под соседними парами полюсов (рис. 1.12). Таким образом, в четырехполюсной машине при одном обходе вокруг якоря последовательно соединяются две секции, в шести- и восьмиполюсных машинах соответственно три и четыре секции и т.д. Концы секций волновой обмотки присоединяются к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстояние шага обмотки по коллектору $y_к = y$. За один обход по якорю укладывается столько секций, сколько пар полюсов имеет машина, при этом конец последней по обходу секции присоединяют к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной. Простая волновая обмотка называется левоходовой, если конец последней по обходу секции присоединяется к коллекторной пластине, расположенной слева от исходной. Если же эта пластина расположена справа от исходной, то обмотка называется правоходовой. Секции волновой обмотки могут быть одновитковыми и многовитковыми.

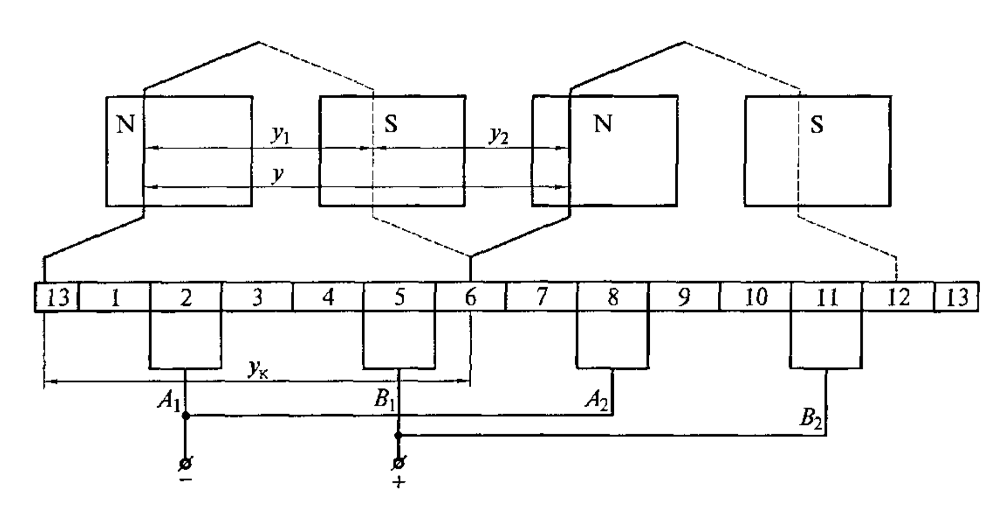



Рис. 1.12. Шаги простой волновой обмотки

Так как шаг обмотки по коллектору $y_к$ охватывает пространство по длине окружности коллектора, соответствующее одной паре полюсов, то, сделав один обход по коллектору, мы как бы перемещаемся на число коллекторных делений, равное $y_к p$ (*p* – число пар полюсов), и переходим к пластине, расположенной рядом с исходной. На основании сказанного можно записать:

$$y_к p = К \pm 1. \quad (1.19)$$

Следовательно, шаг обмотки по коллектору и результирующий шаг по якорю равны, т.е.

$$y_к = y = К \pm 1 / p \quad (1.20)$$

Знак «-» соответствует левоходовой обмотке, а «+» – правоходовой. Выполнение правоходовой обмотки связано с дополнительным расходом меди из-за скрещивания лобовых частей секций, поэтому она почти не имеет практического применения. Первый частичный шаг обмотки по якорю определяется по формуле (1.13), а второй шаг:

$$y_2 = y - y_1 \quad (1.21)$$

Из приведенной схемы простой волновой обмотки видно, что секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины. Следует также отметить, что в такой обмотке можно было бы ограничиться применением только двух щеток, например $B_2$ и $A_2$. Однако в этом случае нарушилась бы симметрия обмотки, так как число секций в параллельных ветвях становится неодинаковым: в одной ветви семь секций, а в другой шесть. Поэтому в машине обычно устанавливают столько щеток, сколько имеется главных полюсов, тем более что это позволяет уменьшить величину тока, приходящегося на каждую щетку, и уменьшить размеры коллектора.

### 1.4.4. Сложная волновая обмотка.

Несколько простых волновых обмоток, уложенных на одном якоре, образуют сложную волновую обмотку. Так как простая волновая обмотка состоит из двух параллельных ветвей, то число параллельных ветвей в сложной волновой обмотке составляет:

$$2a = 2m \quad (1.22)$$

где $m$ – коэффициент кратности, определяющий число простых волновых обмоток, из которых составлена сложная обмотка. Сложная волновая обмотка рассчитывается так же, как и простая. Но для определения шага обмотки по коллектору следует использовать формулу:

$$y_к = К \pm m / p \quad (1.23)$$

Простые волновые обмотки, образующие сложную, соединяются параллельно друг с другом посредством щеток, ширина которых, как и в случае сложной петлевой обмотки, должна обеспечивать одновременное перекрытие не менее т коллекторных пластин.

### 1.4.5. Условия симметрии обмотки.

Обмотка якоря называется *симметричной*, если ее параллельные ветви обладают одинаковыми электрическими свойствами, т. е. имеют одинаковые электрические сопротивления и в них индуцируются одинаковые по величине ЭДС. В несимметричной обмотке ток якоря в параллельных ветвях распределяется неравномерно, что влечет за собой перегрузку одних ветвей и недогрузку других. В результате возрастают электрические потери в обмотке якоря, полезная мощность машины уменьшается, возникает искрение на коллекторе. Обмотка якоря становится симметричной лишь при соблюдении следующих *условий симметрии*:

1) каждая пара параллельных ветвей обмотки должна состоять из одинакового числа секций. Это условие может быть выполнено лишь в том случае, если на каждую пару параллельных ветвей обмотки приходится целое число секций, т. е. отношение $S/a$ равно целому числу. Нетрудно убедиться, что при несоблюдении этого условия электрическое сопротивление параллельных ветвей, а также их ЭДС будут неодинаковыми. Это приведет к неравномерному распределению тока в параллельных ветвях со всеми нежелательными последствиями;

2) секции каждой пары параллельных ветвей должны занимать на якоре одинаковое число пазов, т. е. $Z/a$ равно целому числу, где Z – число реальных пазов на якоре;

3) каждая пара параллельных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение относительно системы полюсов, что может быть соблюдено при условии $2p/a$ равно целому числу. Определим, при каких параметрах выполняется третье условие симметрии для сложной петлевой обмотки. На основании выражения (1.17) получаем:

$$2p / a = 2p / pm = 2 / m \quad (1.24)$$

Все отношения, входящие в выражение (1.24), равны целому числу, т.е. сложная петлевая обмотка может быть симметричной только при $m = 2$. Для устранения уравнительных токов в обмотке якоря недостаточно выполнения условий симметрии обмотки. Для этого необходимо еще, чтобы магнитные потоки полюсов были равны. Кроме того, сопротивления контактов между щетками и коллекторными пластинами каждого из ходов обмотки,

составляющих обмотку, также должны быть равны. Неравенство магнитных потоков полюсов вызывает в петлевых обмотках неравенство ЭДС параллельных ветвей и появление уравнительного тока, замыкающегося через щетки. Вследствие неравенства сопротивлений переходного контакта между щеткой и отдельными коллекторными пластинами в параллельных ветвях обмоток, составляющих сложную обмотку, токи будут разные. Это приводит к случайному распределению напряжения между соседними коллекторными пластинами, в результате чего напряжение может превысить допустимые значения.

### 1.4.6. Уравнительные соединения.

Однако даже при соблюдении всех условий симметрии ЭДС параллельных ветвей обмотки якоря в многополюсных машинах могут оказаться неодинаковыми. Причиной этого является *магнитная асимметрия*, в результате которой магнитные потоки одноименных полюсов становятся неодинаковыми. Происходит это из-за дефектов, возникающих при изготовлении электрической машины (наличие раковин в отливке станины, некачественная сборка полюсов, неправильная центровка якоря, т.е. его перекос) и обусловливающих появление неравномерного воздушного зазора под полюсами. Влияние магнитной асимметрии на работу машины зависит от типа обмотки якоря.

В волновых обмотках секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины, поэтому магнитная асимметрия не вызывает неравенства ЭДС в параллельных ветвях, так как она одинаково влияет на все параллельные ветви обмотки. В петлевых обмотках секции каждой параллельной ветви располагаются под одной парой полюсов, поэтому в результате магнитной асимметрии ЭДС параллельных ветвей становятся неодинаковыми, что приводит к появлению уравнительных токов. Например, при неравенстве ЭДС $e_1$ и $e_2$ потенциалы щеток $A_1$ и $A_2$ неодинаковы, а так как указанные щетки соединены проводом, то в обмотке появится уравнительный ток $I_{ур}$. Если $e_1 > e_2$ то ток $I_{ур}$ во внешней части цепи направлен от щетки $A_1$ к щетке $A_2$. При неравенстве ЭДС во всех четырех ветвях обмотки якоря уравнительные токи появятся также и в цепи щеток $B_1$ и $B_2$. Уравнительные токи, складываясь с током нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку параллельных ветвей, что ведет к перегреву обмотки и увеличению электрических потерь. Кроме того, плотность тока под некоторыми щетками увеличивается и может превысить допустимые пределы, что вызовет искрение на коллекторе.

**Уравнительные соединения первого рода.** Перечисленные явления нарушают нормальную работу машины. Для уменьшения неравномерной нагрузки щеток в простых петлевых обмотках поступают следующим образом: точки обмотки якоря, потенциалы которых теоретически должны быть одинаковыми, соединяют между собой медными проводами. В этом случае возникающие в обмотке уравнительные токи циркулируют внутри обмотки и не протекают по щеткам и соединяющим их шинам. Указанные соединения называются уравнительными соединениями первого рода, или уравнителями (рис. 1.13). Практически доступными для соединения точками равного потенциала являются концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, и лобовые части обмотки со стороны, обратной коллектору. Количество точек в обмотке, имеющих одинаковый потенциал, равно числу полюсов в машине ($p = a$). Расстояние между двумя соседними равнопотенциальными точками называется потенциальным шагом и обозначается $y_{ур}$. При расположении уравнительных соединений со стороны коллектора потенциальный шаг измеряется числом коллекторных делений: $y_{ур} = К / a = К / p$ (1.25)

Полное число уравнительных соединений первого рода, которое можно применить в обмотке: $N_{ур} = К / a$ (1.26)

Однако такое число уравнительных соединений применяют только в машинах большой мощности, например в электродвигателях прокатных станов. В целях экономии меди и упрощения конструкции машины обычно применяют меньшее число уравнителей. Например, в четырехполюсных машинах малой мощности выполняют три-четыре

уравнительных соединения вместо положенных восьми. Для выполнения уравнительных соединений применяют медные провода с сечением, равным $^{1}/_{4}$ – $^{1}/_{2}$ сечения провода обмотки якоря.

**Уравнительные соединения второго рода.** В сложных петлевых и волновых обмотках простые обмотки, образующие сложную обмотку, соединены параллельно. Их параллельное включение осуществляется на коллекторе через щеточный контакт. Однако обеспечить одинаковую величину тока в месте контакта щетки и коллекторной пластины из-за разности переходных сопротивлений невозможно. Поэтому ток между обмотками распределяется неодинаково, что нарушает равномерное распределение потенциала по коллектору и может вызвать на нем искрение. Для устранения этого нежелательного явления применяют уравнительные соединения второго рода, посредством которых простые обмотки соединяются между собой в точках равного потенциала.

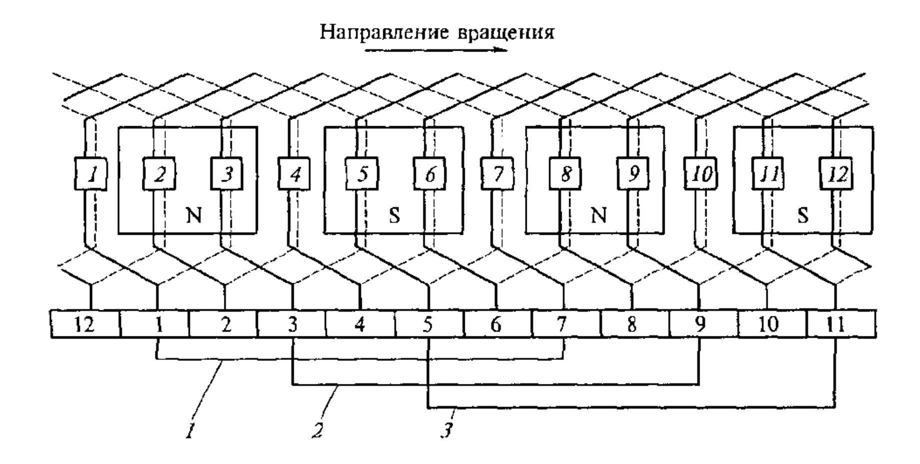



Рис. 1.13 Уравнительные соединения (1–3) первого рода.

Таким образом, если уравнители первого рода выравнивают асимметрию магнитной системы машины, то уравнители второго рода устраняют неравномерность в распределении потенциала по коллектору. В схеме сложной волновой обмотки уравнители второго рода соединяют коллекторные пластины одинакового потенциала и отстоят друг от друга на расстоянии, равном потенциальному шагу $y_{ур}$. Полное число уравнителей второго рода определяется по выражению (1.26), однако из соображений экономии меди их число обычно меньше расчетного.

### 1.4.7. Комбинированная обмотка.

Комбинированная (лягушечья) обмотка представляет собой сочетание петлевой ($y_{петл}$) и волновой ($y_{волн}$) обмоток, расположенных в одних пазах и присоединенных к общему коллектору. Секция этой обмотки показана на рис. 1.14. Комбинированную обмотку можно рассматривать как две параллельно соединенных обмотки: петлевую и волновую. Каждая простая обмотка выполняется двухслойной, поэтому комбинированная обмотка укладывается на якоре в четыре слоя, а к каждой пластине коллектора припаивается по четыре проводника. Комбинированная обмотка применяется в мощных электрических машинах. Ее основное преимущество состоит в том, что она не требует уравнительных соединений. Обмотки, составляющие комбинированную, имеют одинаковые шаги по якорю:

$$y_{1петл} = y_{1волн} \quad (1.27)$$

Шаг комбинированной обмотки равен сумме шагов простых обмоток:

$$y_{1петл} = y_{1волн} = Z_э / 2p + Z_э / 2p = Z_э / p \quad (1.28)$$

Поскольку число элементарных пазов $Z_э$ = К, то $y_{1петл} = y_{1волн}$ = К / $p$ = $y_{ур}$ т. е. шаг обмотки по якорю равен потенциальному шагу. Следовательно, те коллекторные пластины, которые должны быть соединены уравнителями, в комбинированной обмотке соединяются секциями, поэтому уравнительные соединения в данной обмотке не применяются.

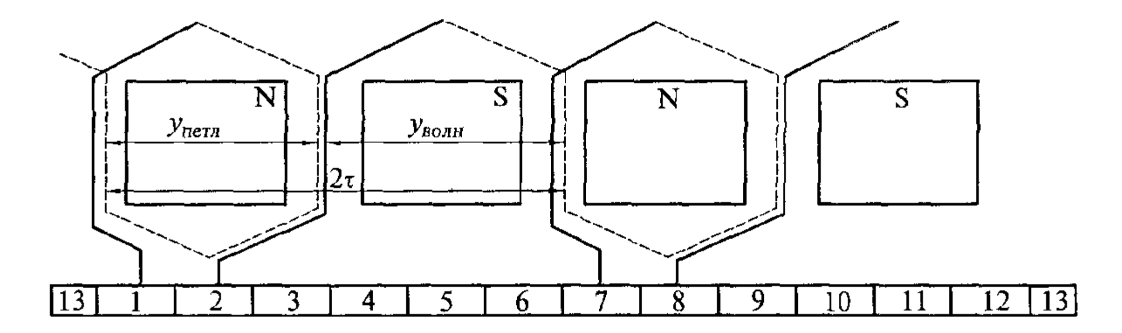



Рис. 1.14. Развернутая схема комбинированной обмотки якоря, τ – полюсное деление.

Для изготовления обмотки якоря нет необходимости строить полную развернутую схему этой обмотки. В этом случае изображается одна секция с указанием номеров пазов, в которые она укладывается, и коллекторных пластин, к которым подсоединяются выводы. На этой схеме указывается порядок присоединения изображаемых секций к коллекторным пластинам и то, что эти секции можно изолировать вместе, т.е. соединить в одну катушку. Номера пластин и секций, указанные на схеме, определяют шаги обмотки по якорю и по коллектору. По этой схеме изготовляют секции или катушки, которые затем укладывают в пазы сердечника якоря и соединяют с пластинами коллектора. В рассмотренных схемах все секции якорных обмоток имеют одинаковую ширину. Такие равносекционные обмотки удобны в изготовлении, особенно если пазы сердечника якоря открыты. В этом случае секции, лежащие в одних и тех же пазах, изолируются вместе (как единая катушка), а затем укладываются в пазы. Но возможна и другая конструкция обмотки – ступенчатая, в которой секции имеют разную ширину. При этом одна активная сторона каждой из нескольких секций ступенчатой обмотки располагается в одном пазу, а другие активные стороны этих секций располагаются в разных пазах.

### 1.5. Электродвижущая сила обмотки якоря.

Магнитная индукция $B_\delta$ в воздушном зазоре между полюсными наконечниками и поверхностью якоря в различных точках по окружности якоря имеет неодинаковые значения. Поэтому для определения ЭДС удобно воспользоваться средним значением магнитной индукции, приняв его равным высоте прямоугольника AB'C'D с основанием τ, площадь которого равна площади фигуры ABCD (рис. 1.15). Тогда среднее значение ЭДС, индуцируемой в одном проводнике, уложенном на поверхности якоря, равно

$$E_{ср} = B_{ср} l v. \quad (1.29)$$

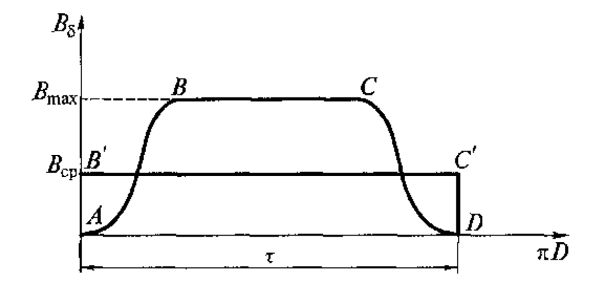



Рис. 1.15. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

Обмотка якоря состоит из $N$ проводников, однако ЭДС обмотки определяется величиной ЭДС лишь одной параллельной ветви, которая содержит $N/2a$ последовательно соединенных проводников. Таким образом, ЭДС обмотки якоря:

$$E_я = E_{ср} N / 2a = B_{ср} l v N / 2a \quad (1.30)$$

где $l$ – длина активной части якоря, м; $v = \pi D n / 60$ – линейная скорость на поверхности

вращающегося якоря, м/с; $n$ – частота вращения якоря, об/мин; D – диаметр якоря, м. Длину окружности якоря $\pi D$ можно выразить следующим образом:

$$\pi D = \tau \times 2p \quad (1.31)$$

тогда:

$$v = 2\tau pn / 60 \quad (1.32)$$

Подставив это выражение в выражение (1.30), получим:

$$E_я = B_{ср} l \times (2\tau pn / 60) \times (N / 2a) \quad (1.33)$$

Произведение $l\tau$ есть площадь, которую пронизывает магнитный поток одного полюса, поэтому:

$$B_{ср} l\tau = \Phi \quad (1.34)$$

где Φ – магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом, $B_\delta$. Следовательно, ЭДС обмотки якоря:

$$E_я = (pN / 60a) \times (\Phi n) \quad (1.35)$$

Величина $pN / 60a$ – для данной машины является постоянной, поэтому обозначив ее:

$$c_е = pN / 60a \quad (1.36)$$

окончательно получаем:

$$E_я = c_е \Phi n \quad (1.37)$$

## 1.6. Выбор типа обмотки якоря.

Применение в машине постоянного тока определенного типа якорной обмотки обусловлено требованиями как технического, так и экономического характера. Выбранный тип обмотки должен обеспечивать получение необходимой величины ЭДС при определенной величине тока. При этом следует стремиться к минимальному числу уравнительных соединений. Требования экономического характера при выборе типа обмотки сводятся к максимально возможному заполнению пазов сердечника якоря, что определяется коэффициентом заполнения паза:

$$K_п = S_м / S_п \quad (1.38)$$

где $S_м$ – площадь сечения всех уложенных в один паз медных проводников, мм$^2$; $S_п$ – площадь сечения одного паза, мм$^2$. При укладке в паз большого числа проводников значительная часть площади сечения паза будет занята изоляцией этих проводников. Поэтому выбранный тип обмотки якоря должен соответствовать возможно меньшему числу проводников. Преобразуя формулу (1.35) для ЭДС обмотки якоря, получим:

$$N = 60a \times (E_я / p\Phi n) \quad (1.39)$$

Как видим, при заданных значениях $E_я$, $p$, Φ и $n$ число проводников $n$ обмотке прямо пропорционально числу пар параллельных ветвей $a$. Таким образом, при выборе типа обмотки следует отдавать предпочтение обмоткам с минимальным числом параллельных ветвей. Исходя из этих соображений наиболее желательной является простая волновая обмотка ($a = 1$), тем более что она не требует уравнительных соединений. Однако применение этой обмотки ограничивается следующими условиями:

• допустимая величина тока в параллельной ветви не должна превышать 350 А в машинах без компенсационной обмотки и 500 А в машинах с компенсационной обмоткой;

• предельно допустимое напряжение между двумя смежными коллекторными пластинами не должно превышать 25... 28 В в машинах большой мощности, 30... 35 В в машинах средней мощности и 50... 60 В в машинах малой мощности. При превышении указанных пределов в машине может возникнуть «круговой огонь» – особенно опасное для машины явление. Если простую волновую обмотку применить невозможно, используют другой тип обмотки с большим числом параллельных ветвей, например сложную волновую обмотку. Однако на практике самой распространенной является простая петлевая обмотка, за ней следуют сложная петлевая, простая волновая, сложная волновая и комбинированная.

*Таблица 1.1. Области применения различных типов якорных обмоток.*

| Тип обмотки | Основная область применения |
|---|---|
| Простая волновая | Машины мощностью до 50 кВт, при напряжении 110...230 В. Машины мощностью 50...500 кВт, при напряжении свыше 440 В. |
| Сложная волновая | Машины мощностью 50...500 кВт, при напряжении 440...600 В. |
| Простая петлевая | Машины мощностью 50...500 кВт, при напряжении 110...230 В. Машины мощностью свыше 500 кВт, при напряжении 440...600 В. |
| Сложная петлевая | Машины мощностью до 500 кВт, при напряжении до 240 В. Машины мощностью свыше 500 кВт, при напряжении свыше 600 В. |
| Комбинированная | Машины мощностью свыше 500 кВт, при напряжении свыше 600 В. |

Лобовые соединения обмоток из лакированного медного проводника, как правило, дополнительно не изолируются. Лобовые соединения обмоточных элементов с неизолированной медью в качестве исходного материала при открытых пазах изолируются все вместе, а при полуоткрытых пазах каждый проводник изолируется отдельно перед укладкой в паз путем намотки вполнахлеста пропитанной ленты из стеклоткани. Места переходов от паза к лобовым соединениям обычно подвергают усиленной изоляции. Между верхним и нижним слоями той части обмоток, где действует полное напряжение машины, по всей окружности закладываются ленты из слюдостеклоткани или асбостеклоткань толщиной 0,5... 1,0 мм. Основные области применения различных типов якорных обмоток в зависимости от мощности машины и рабочего напряжения приведены в табл. 1.1.

## 1.7. Магнитная цепь машины постоянного тока.

Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения 1 (рис. 1.16) машины постоянного тока, замыкается через характерные участки машины, образующие ее магнитную цепь. Участками магнитной цепи являются ярмо (станина) 3, сердечники полюсов 2 (включая полюсные башмаки 4, или наконечники), сердечник якоря 5, обмотка якоря 6, зубец 7 и воздушный зазор 8 между полюсными наконечниками 4 и якорем. На рис. 1.16 изображена магнитная система машины постоянного тока с одной парой главных полюсов в режиме холостого хода. Аналогично происходит распределение магнитных потоков и в машинах с бóльшим количеством главных полюсов. Во всех случаях магнитная система представляет собой разветвленную симметричную цепь. Магнитный поток каждого полюса разделяется на две равные части и направляется к двум соседним полюсам. Величина магнитного потока прямо пропорциональна магнитодвижущей силе (МДС) F и обратно пропорциональна сумме магнитных сопротивлений $\sum r_м$ всех участков магнитной цепи:

$$\Phi = F / \sum r_м \quad (1.40)$$

Величину основного (полезного) магнитного потока в зазоре, необходимую для наведения в обмотке якоря требуемой ЭДС, можно определить из выражения (1.35):

$$\Phi = (60a / pN) \times (E_я / n) \quad (1.41)$$

Величина МДС, необходимая для создания в магнитной цепи требуемого магнитного потока, определяется при расчете магнитной цепи. Расчетная часть магнитной цепи машины состоит из пяти участков, отличающихся размерами и свойствами материалов, из которых они изготовлены, поэтому для каждого участка рассчитывают свою МДС: $F_\delta$ – для воздушного зазора; $F_з$ – для зубцового слоя; $F_я$ – для сердечника якоря; $F_п$ – для сердечников пары полюсов; $F_{ярм}$ – для ярма.

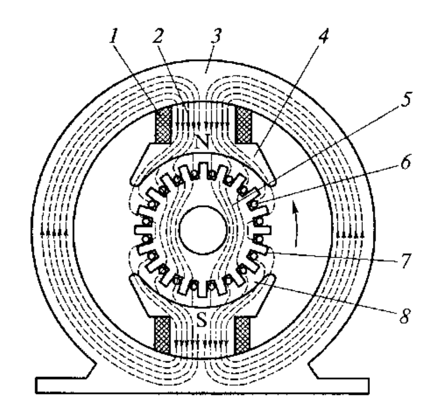



Рис. 1.16. Магнитная система машины постоянного тока.
1 – обмотка возбуждения; 2 – сердечник полюса; 3 – станина; 4 – башмак полюса;
5 – сердечник якоря; 6 – обмотка якоря; 7– зубец; 8– воздушный зазор.

Сумма МДС всех участков магнитной цепи представляет собой величину МДС обмотки возбуждения:

$$F_{о.в} = F_{\delta} + F_{з} + F_{я} + F_{п} + F_{ярм} \quad (1.42)$$

Расчетная часть магнитной цепи включает в себя два полюса, поэтому вычисляемое значение МДС $F_{0B}$ представляет собой МДС обмотки возбуждения одной пары полюсов. Кроме того, выражение (1.42) справедливо лишь для режима холостого хода, т.е. при работе машины без нагрузки. Таким образом, создаваемый $F_{о.в}$ магнитный поток Ф наводит в обмотке якоря ЭДС $E_{я}$ заданной величины лишь в режиме холостого хода. Впоследствии будет показано, что для получения заданной величины ЭДС $E_{я}$ под нагрузкой потребуется несколько большая МДС. Определим слагаемые в выражении (1.42). МДС воздушного зазора определяется по формуле:

$$F_{\delta} = (2B_{\delta max}\delta K_{\delta}) / \mu_0 \quad (1.43)$$

где $B_{\delta max}$ – максимальная магнитная индукция в зазоре машины, Тл; δ – величина воздушного зазора, м; $K_{\delta}$ – коэффициент зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления зазора вследствие зубчатости поверхности якоря ($K_{\delta}$ = 1...2); $\mu_0$ – магнитная проницаемость воздуха ($\mu 0 = 4\times10^{-7}\pi$ Гн/м). МДС остальных участков магнитной цепи, выполненных из стали, определяются по формуле:

$$F_{x} = H_{x}l_{x} \quad (1.44)$$

где $H_{x}$– напряженность магнитного поля, А/м, на длине участка $l_{x}$, м, которая зависит от магнитной индукции и определяется по кривым намагничивания. Величина магнитной индукции в различных участках цепи определяется по формуле

$$B_{x}= Ф_{x} / S_{x} \quad (1.45)$$

где $Ф_{x}$ – магнитный поток на участке магнитной цепи, $B_{\delta}$; $S_{x}$– площадь поперечного сечения этого участка, м$^2$. Используя выражения (1.42) –(1.44), можно записать выражение для МДС пары полюсов электрической машины, изображенной на рис. 1.16:

$$F_{о.в} = 2(B_{\delta} / \mu_0) + 2H_{З}h_{З}+H_{я}l_{я}+2H_{п}h_{п} + H_{ярм}l_{ярм} \quad (1.46)$$

где $H_{З}$, $H_{я}$, $H_{п}$, $H_{ярм}$ – напряженность магнитного поля соответственно зубца, сердечника якоря, сердечника полюса и ярма, А/м; $h_{З}$ и $h_{п}$ – высота зубцового слоя и главного полюса, м; $l_{я}$ и $l_{ярм}$ – длина средней силовой линии по якорю и ярму, м. Если полюсные башмаки имеют пазы для компенсационной обмотки, то к перечисленным в выражении (1.46) пяти участкам магнитной цепи добавляется еще один – зубцы полюсного башмака. Наибольшим магнитным сопротивлением обладает воздушный зазор, поэтому значительная часть результирующей МДС $F_{о.в}$ затрачивается на преодоление его магнитного сопротивления. Магнитное сопротивление других участков магнитной цепи, выполненных из стали, зависит от степени магнитного насыщения стали. В условиях наибольшего магнитного насыщения находится зубцовый слой, поэтому его магнитное сопротивление больше, чем сопротивление других участков магнитной цепи, выполненных из стали.

Как известно, ферромагнитные материалы обладают свойством магнитного насыщения. Поэтому зависимость между магнитным потоком машины и МДС нелинейная, т. е. поток увеличивается не пропорционально увеличению МДС обмотки возбуждения. Это подтверждается графически зависимостью Ф = *f* (F), которая называется *характеристикой намагничивания* машины (рис. 1.17). В начальной части характеристика прямолинейна. Объясняется это тем, что при сравнительно небольших значениях магнитного потока, когда магнитная цепь не насыщена, МДС обмотки возбуждения $F_{о.в}$ определяется лишь величиной МДС воздушного зазора $F_s$, так как магнитное сопротивление остальных участков магнитной цепи весьма незначительно. Как видно из выражения (1.43), МДС F$ пропорциональна магнитной индукции $B_5$, а следовательно, пропорциональна и магнитному потоку. Поэтому касательная к кривой намагничивания, проведенная через начало координат, представляет собой зависимость МДС воздушного зазора $F_\delta$ от полезного магнитного потока Ф. При увеличении МДС обмотки возбуждения до значений, выходящих за пределы линейного участка, наступает магнитное насыщение стальных элементов цепи и зависимость Ф = *f* (F) становится нелинейной. Первым из всех участков насыщается зубцовый слой якоря. Поэтому МДС $F_3$ на этом участке с увеличением магнитного потока растет интенсивнее, чем на остальных участках магнитной цепи

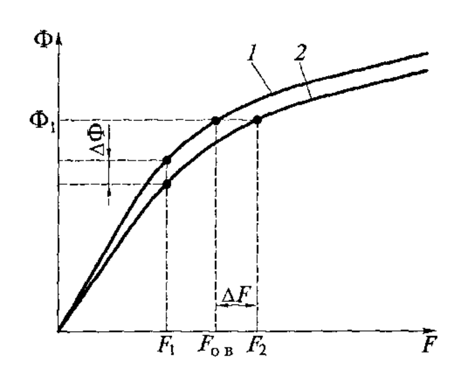



Рис. 1.17. Характеристика намагничивания электрической машины.
1 – режим холостого хода; 2 – режим работы под нагрузкой.

Отношение результирующей МДС $\sum F$ к МДС воздушного зазора называется коэффициентом насыщения электрической машины:

$$K_\mu = \sum F / F_\delta \quad (1.47)$$

По величине $K_\mu$ можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины и степени использования магнитных материалов. Обычно машина работает при насыщенной магнитной системе, т.е. при $K_\mu > 1$. Для машин традиционного исполнения $K_\mu$ = 1,25...1,75. На рис. 1.17 значение ΔФ иллюстрирует изменение величины магнитного потока Ф электрической машины, работающей в режиме холостого хода и под нагрузкой, при одном и том же значении МДС $F_1$ а $\Delta F = F_2 - F_{о.в}$ – изменение МДС для поддержания постоянного значения магнитного потока $Ф_1$. Как следует из выражения (1.35), при неизменной частоте вращения ЭДС машины постоянного тока $E_я$ пропорциональна величине магнитного потока Ф, а МДС возбуждения пропорциональна величине тока возбуждения $I_в$:

$$F_{о.в} = 2I_в w_в \quad (1.48)$$

Кривая намагничивания Ф = *f* (F) отражает зависимость ЭДС машины от тока возбуждения $E_я = f(I_в)$ и называется характеристикой холостого хода машины.

### 1.8. Реакция якоря.

При работе машины постоянного тока в режиме холостого хода ток в обмотке якоря отсутствует, и в магнитной цепи машины действует лишь МДС обмотки возбуждения $F_{о.в}$. Магнитное поле машины в этом случае является симметричным относительно оси полюсов,

а график распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапецеидальной. Если же машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который создаст собственную МДС обмотки якоря $F_{оя}$. Предположим, что МДС обмотки возбуждения равна нулю и в машине действует лишь МДС $F_{оя}$. Магнитное поле, создаваемое обмоткой якоря, изображено на рис. 1.18. Как видно из рисунка, МДС обмотки якоря направлена по линии щеток (в данном случае по геометрической нейтрали). Несмотря на то, что якорь вращается, пространственное направление МДС обмотки якоря остается неизменным, так как зависит исключительно от положения щеток. Наибольшее значение МДС $F_{оя}$ имеет на линии щеток, а по оси полюсов она равна нулю. Однако распределение магнитной индукции поля якоря в воздушном зазоре совпадает с распределением МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко уменьшается, что объясняется увеличением магнитного сопротивления. Величина МДС обмотки якоря $F_{оя}$ определяется числом проводников обмотки якоря, приходящихся на одно полюсное деление τ, и величиной тока $i_а$ в этих проводниках:

$$F_{оя} = (N / \pi \mathrm{D})\, i_а \tau \quad (1.49)$$

где $N / \pi$D – число проводников обмотки якоря на единицу длины окружности якоря;
$i_а = I_я / 2a$ – ток в проводниках обмотки якоря, равный току параллельной ветви, А.
Обозначив $(N / \pi \mathrm{D})\, i_а$ = A, получим следующее выражение для МДС обмотки якоря:

$$F_{оя} = \mathrm{A}\tau \quad (1.50)$$

где A– линейная нагрузка якоря, А/м, характеризующая часть МДС якоря, приходящуюся на единицу длины его окружности. Значение линейной нагрузки может находиться в пределах 6500... 70000 А/м в зависимости от мощности машины.

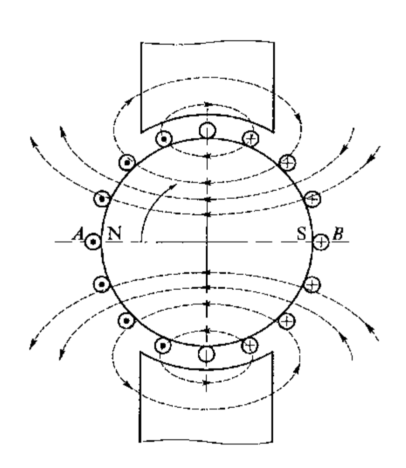



Рис. 1.18. Магнитное поле, создаваемое обмоткой якоря.

В нагруженной машине постоянного тока действуют две МДС – обмотки возбуждения $F_{оя}$ и обмотки якоря $F_{оя}$. Влияние МДС обмотки якоря на основное магнитное поле машины называется *реакцией якоря*. Реакция якоря искажает основное магнитное поле, делая его несимметричным относительно оси полюсов машины. На рис. 1.19 показано распределение линий результирующего магнитного поля машины, работающей в режиме генератора, при вращении якоря по часовой стрелке. Такое же распределение линий магнитного поля имеет и двигатель, но только при вращении якоря против часовой стрелки. Если предположить, что магнитная система машины не насыщена, то реакция якоря лишь искажает результирующий магнитный поток, не изменяя его величины. Край полюса и находящийся под ним зубцовый слой сердечника якоря, где направление МДС обмотки якоря $F_{оя}$ совпадает с направлением МДС главных полюсов $F_{оя}$, подмагничиваются. Другой край полюса и зубцы, где МДС якоря и МДС главных полюсов направлены встречно, размагничиваются. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль A'B' (линия, проходящая через точки на

якоре, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали АВ на некоторый угол. Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажается результирующее поле, а следовательно, тем на больший угол смещается физическая нейтраль. При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе в режиме двигателя – навстречу вращению якоря. Искажение результирующего поля машины неблагоприятно сказывается на ее рабочих характеристиках. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта и может служить причиной искрообразования на коллекторе.

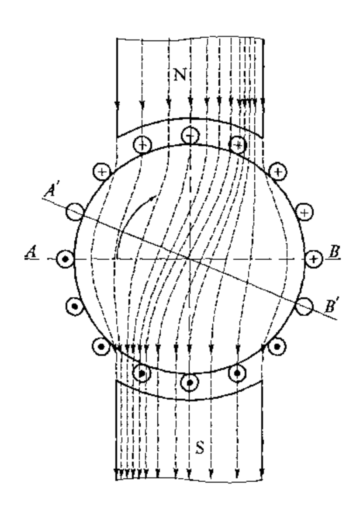



Рис. 1.19. Форма результирующего магнитного поля машины в режиме нагрузки.

Во-вторых, искажение результирующего поля машины влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре. В результате мгновенные значения ЭДС секций обмотки якоря в моменты попадания их активных сторон в зоны максимальных значений индукции (под подмагниченные края полюсных наконечников) повышаются. Это приводит к росту напряжения $U_к$ между смежными коллекторными пластинами. При значительных перегрузках машины напряжение $U_к$ может превысить допустимые значения, в результате чего между пластинами может возникнуть электрическая дуга. Имеющиеся на коллекторе частицы графита и металлическая пыль способствуют развитию электрической дуги, нарушающей работу электрической машины. Если же магнитная система машины насыщена (как и бывает в большинстве случаев), то подмагничивание одного края полюсного наконечника и находящегося под ним зубцового слоя сердечника якоря происходит в меньшей степени, чем размагничивание другого края и находящегося под ним зубцового слоя якоря. Это благоприятно сказывается на распределении индукции в зазоре, которое становится более равномерным. Однако величина результирующего потока при этом уменьшается. Другими словами, *реакция якоря в машине с насыщенной магнитной системой размагничивает машину*. В результате ухудшаются рабочие характеристики машины: у генераторов снижается величина вырабатываемой ЭДС, у двигателей уменьшается крутящий момент. Размагничивающее влияние реакции якоря усиливается при смещении щеток с геометрической нейтрали. Объясняется это тем, что вместе со щетками смещается и вектор МДС обмотки якоря $F_{оя}$ (рис. 1.20). При этом $F_{оя}$ помимо поперечной составляющей $F_{ояq} = F_{оя}\cos\beta$ приобретает еще и продольную составляющую $F_{ояq} = F_{оя}\sin\beta$, направленную вдоль оси полюсов. Если машина работает в режиме генератора, то при смещении щеток в направлении вращения якоря продольная составляющая МДС якоря $F_{ояd}$ действует встречно МДС обмотки возбуждения $F_{ов}$, что ведет к ослаблению основного магнитного потока машины. При смещении щеток против направления вращения якоря продольная составляющая $F_{ояd}$ действует согласованно с $F_{ов}$, что ведет к некоторому увеличению основного магнитного потока машины.

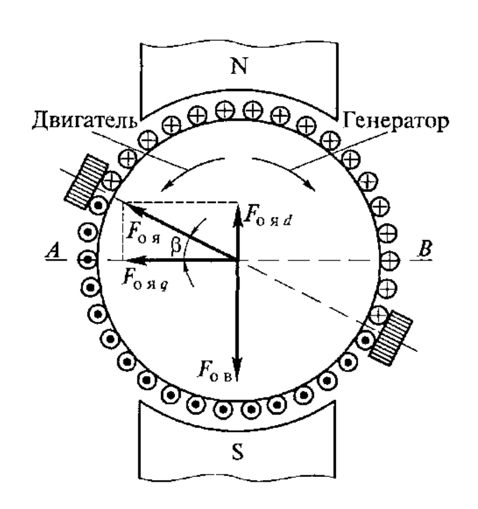



Рис. 1.20. Смещение вектора МДС магнитного поля якоря

Если же машина работает в режиме двигателя, то при смещении щеток в направлении вращения якоря продольная составляющая МДС якоря $F_{\text{ояd}}$ действует согласованно с МДС $F_{\text{ов}}$. При смещении щеток против направления вращения якоря $F_{\text{ояd}}$ действует встречно МДС $F_{\text{ов}}$ и размагничивает машину. Вместе с тем смещение щеток с геометрической нейтрали АВ ослабляет искажающее влияние реакции якоря. Дело в том, что когда щетки расположены на геометрической нейтрали, МДС обмотки якоря $F_{\text{оя}}$ имеет только поперечную составляющую ($F_{\text{ояq}}$ = $F_{\text{оя}}$) а при смещении щеток на угол β относительно геометрической нейтрали поперечная составляющая МДС обмотки якоря уменьшается ($F_{\text{ояq}} = F_{\text{оя}}\cos\beta$). В коллекторных машинах постоянного тока компенсация реактивной ЭДС $e_{\text{ря}}$ осуществляется смещением щеток с геометрической нейтрали на угол β по направлению вращения якоря в генераторах, или против вращения якоря в двигателях. Щетки следует смещать за электрическую нейтраль так, чтобы индукция в зоне коммутации имела такое направление и величину, при которых в коммутирующих секциях индуцируется ЭДС, достаточная для компенсации реактивной ЭДС. Однако для полной компенсации реактивной ЭДС $e_{\text{ря}}$ при различных нагрузках машины пришлось бы каждый раз менять положение щеток, так как положение физической нейтрали изменяется в зависимости от нагрузки. Поэтому обычно щетки устанавливают в определенное фиксированное положение, при котором полная компенсация реактивной ЭДС соответствует некоторой средней нагрузке при продолжительном режиме работы машины. Следует также напомнить, что при смещении щеток с геометрической нейтрали усиливается размагничивающее действие реакции якоря. Для машин, работающих с изменением направления вращения (с реверсом), смещение щеток с геометрической нейтрали недопустимо, так как направление смещения физической нейтрали меняется с изменением направления вращения.

**Добавочные полюса.** Влияние реакции якоря на работу щеточного контакта устраняется установкой добавочных полюсов между главными полюсами. МДС этих полюсов устраняет влияние поперечной составляющей МДС обмотки якоря на геометрической нейтрали (в зоне коммутации). Добавочные полюса применяют в машинах мощностью свыше 1 кВт. Обычно МДС обмотки добавочных полюсов $F_{\text{d}}$ на 15...30% больше МДС обмотки якоря $F_{\text{оя}}$. Если величину $F_{\text{d}}$ сделать больше указанной, то реактивная ЭДС в коммутируемой секции обусловливает возникновение тока коммутации $i_{\text{k}}$, направленного противоположно рабочему току секции. Для компенсации влияния ЭДС $e_{\text{ря}}$ при различных нагрузках машины обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря. В этом случае с изменением нагрузки машины МДС $F_{\text{d}}$ изменяется пропорционально току якоря $I_{\text{я}}$, а следовательно, пропорционально МДС обмотки якоря $F_{\text{я}}$. Полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как у главного полюса, следующего по направлению вращения, а в двигателе – как у предшествующего. Добавочные полюса обеспечивают удовлетворительную коммутацию в машине только в пределах номинальной нагрузки $I_{\text{ном}}$.

При перегрузках машины происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная ЭДС $e_{ря}$ продолжает изменяться пропорционально току нагрузки, а рост ЭДС генератора из-за насыщения магнитной цепи несколько задерживается. Насыщению сердечников добавочных полюсов способствует магнитный поток рассеяния $\Phi_{др}$, замыкающийся через сердечники смежных главных полюсов и станину. В целях уменьшения магнитного потока рассеяния, а следовательно, обеспечения более линейной зависимости потока добавочных полюсов от тока нагрузки, воздушный зазор разделяют на две части: $\delta_1$ (находится между сердечником добавочного полюса и якорем) и $\delta_2$ (находится между сердечником добавочного полюса и станиной). В этом случае зазор $\delta_2$ ограничит поток рассеяния $\Phi_{др}$. Зазор $\delta_2$ создается с помощью пакета прокладок из немагнитного материала, закладываемых между станиной и сердечником добавочного полюса. Обычно в машине устанавливают столько же добавочных полюсов, сколько и главных. Исключение составляют некоторые машины специального назначения, в которых из конструктивных соображений число добавочных полюсов уменьшают в два раза. Электрические машины мощностью до 1 кВт выполняются без добавочных полюсов.

**Компенсационная обмотка.** Действенным средством устранения неравномерного распределения индукции в воздушном зазоре является применение в машинах постоянного тока *компенсационной обмотки*. Компенсационная обмотка укладывается в пазах наконечников главных полюсов и включается последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы ее МДС $F_{ко}$ была направлена встречно МДС обмотки якоря $F_{оя}$. Компенсационная обмотка распределяется по всей поверхности полюсного наконечника всех главных полюсов. Включение компенсационной обмотки последовательно с обмоткой якоря обеспечивает автоматическую компенсацию МДС обмотки якоря при любой нагрузке машины. При наличии компенсационной обмотки магнитное поле машины при переходе из режима холостого хода к режиму нагрузки остается практически неизменным. Машина постоянного тока с компенсационной обмоткой более надежна в работе. Однако компенсационная обмотка делает машину дороже и сложнее, поэтому ее применяют только в машинах большой мощности, работающих с резкими колебаниями нагрузки.

### 1.9. Коммутация в машинах постоянного тока.

Коммутацией называется процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую путем замыкания этих секций щетками. В одной из двух параллельных ветвей, имеющих общую щетку, ток направлен от начала секции к концу, а во второй – от конца к началу, поэтому за время коммутации направление тока в переключаемой секции должно измениться на противоположное. На рис. 1.21 показаны три положения секции одноходовой петлевой обмотки в процессе коммутации. Ширина щетки $b_щ$ принята равной ширине коллекторного деления $t_к$, толщина изоляции между коллекторными пластинами не учитывается. Предполагается, что нагрузка машины постоянна и ток в каждой параллельной ветви равен $i_a$. В начальный момент времени ($t = 0$) щетка находится под пластиной 2 (рис. 1.21, *а*), ток секции $i_c$ в проводнике *cd* и в коллекторной пластине 2 равен току двух параллельных ветвей, т.е. $2i_a$. В проводнике *ab* ток секции $i_c = 0$. В секции *ac*, присоединенной к коллекторным пластинам 1 и 2, ток $i_c = i_a$ и направлен от начала *a* секции к ее концу *c*. Через отрезок времени $t < T_к$ после начала переключения секции *ac* обе коллекторные пластины 1 и 2 оказываются расположенными над щеткой, и ток параллельных ветвей проходит по проводникам *ab* и *cd* (рис. 1.21, *б*). В конечный момент коммутации коллекторная пластина 1 занимает над щеткой положение пластины 2, ток обеих параллельных ветвей обмотки направлен по проводнику *ab* к коллекторной пластине 1, так что $i_c = 2i_a$ и $i_c = 0$. В рассматриваемой секции ток направлен от конца *c* к началу *a*, т.е. $i_c = -i_a$ (рис. 1.21, *в*). Время $T_к$, за которое происходит переключение секции из одной параллельной ветви в другую, называют периодом коммутации, обычно оно составляет 0,0001...0,0003 с.

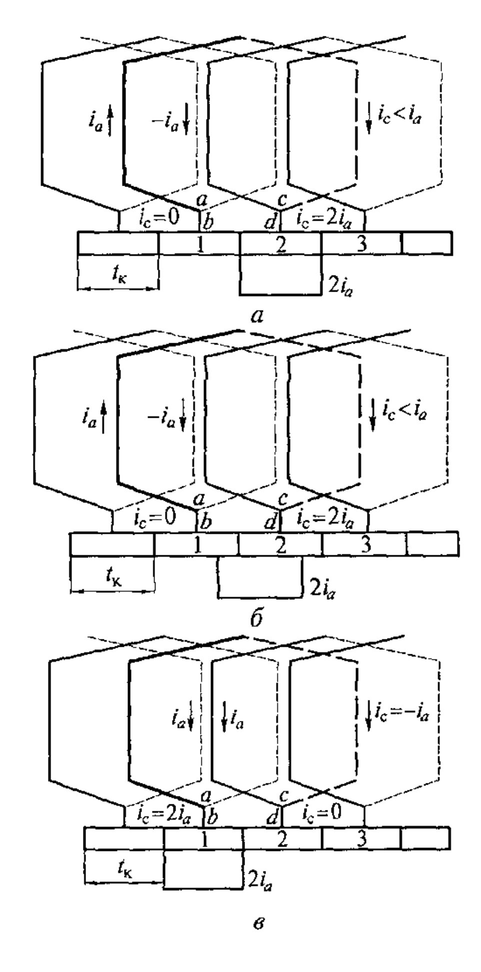



Рис. 1.21. Схема коммутации секций обмотки якоря.

Время $T_п$ за которое секция перемещается от одной щетки к другой, значительно больше, и ток в этой секции сохраняется неизменным в течение $T_п$. Для определения тока в секции воспользуемся уравнением равновесия ЭДС и напряжений. Согласно второму правилу Кирхгофа алгебраическая сумма падений напряжений в замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре: $\sum e = \sum ir$. Цепь (см. рис. 1.21, *б*), состоит из пяти участков: секции *ас* с сопротивлением $r_c$, соединительного провода лобовой части *cd* с сопротивлением $r_{пр}$ контакта пластины 2 со сбегающей частью щетки, имеющего сопротивление $r_{щ2}$, контакта пластины 1 с набегающей частью щетки, имеющего сопротивление $r_{щ1}$, и соединительного провода лобовой части *ba* с сопротивлением $r_{пр}$. При правом обходе этой цепи, начиная с узла а, сумма падений напряжений:

$$i_c r_c + i_c r_{пр} + i_c r_{щ2} - i_c r_{щ1} - i_c r_{пр} = \sum e \quad (1.51)$$

Согласно теории коммутации общее сопротивление $r_щ$ контакта соответствует полной рабочей поверхности щетки, распределяется обратно пропорционально величине поверхности соприкосновения щетки с коллекторными пластинами и не зависит от плотности тока в контакте. При наиболее распространенных угольных и электрографитовых щетках сопротивление скользящего контакта значительно превосходит сопротивление остальных участков рассматриваемой цепи, поэтому можно не учитывать влияние сопротивлений $r_c$ и $r_{пр}$ на изменение тока $i_c$. Применив это допущение, получим

$$i_c = i_a (1 - 2t / T_к) + \sum e / r_щ (T_к / t + T_к / T_к - t) \quad (1.52)$$

**Линейное изменение тока.** Если $\sum e = 0$, т. е. слагаемые этой суммы уравновешивают друг друга, или каждое из слагаемых равно нулю (при очень малой скорости вращения якоря), то изменение тока в переключаемой секции происходит вследствие одновременного увеличения сопротивления контакта сбегающей части щетки с коллекторной пластиной и уменьшения сопротивления контакта набегающей части щетки. В таком случае в выражении (1.52) остается только составляющая: $i_c = i_a (1 - 2t / T_к)$ (1.53)

Плотность тока в набегающей части щетки равна току секции $i_a$ деленному на площадь контакта этой части щетки. Таким образом, при линейном изменении тока в переключаемой секции плотности тока в набегающей и сбегающей частях щетки одинаковы в течение всего периода коммутации. При учете сопротивления секции и лобовых соединений в первую половину периода коммутации изменение тока в секции происходит быстрее, а во вторую – медленнее. Вызванное этим увеличение плотности тока в набегающей и сбегающей частях щетки невелико, так как для графитовых щеток $r_щ$ значительно больше $r_с = 2r_{пр}$.

**Замедленное и ускоренное изменение тока**. При наличии ЭДС в переключаемой секции ($\sum e = 0$) ток в секции $i_с$ состоит из двух составляющих. Первая из них замыкается через внешнюю цепь машины и зависит от тока в обмотке якоря. Вторая составляющая

$$i_к = \sum e / r_щ \, (T_к / t + T_к / T_к - t) \quad (1.54)$$

замыкается по цепям секция–щетка (рис. 1.22) и, таким образом, является током короткого замыкания секции. Знаменатель выражения (1.54) представляет собой переменное в течение периода коммутации $T_к$ сопротивление соединенных последовательно контактов коллекторных пластин с набегающей и сбегающей частями щетки. Минимальное сопротивление соответствует времени $T_к/2$. При $t = 0$ и $t = T_к$ сопротивление контактов достигает бесконечно большого значения, соответствующего разрыву цепи короткого замыкания секции. Как и ток, ЭДС считается положительной, если ее направление совпадает с направлением прямого обхода рассматриваемой цепи. При постоянном положительном значении $\sum e$ ток короткого замыкания в течение всего периода коммутации имеет положительное значение и достигает максимальной величины $i_{кmax} = \sum e / 4r_щ$ при $t = T_к/2$.

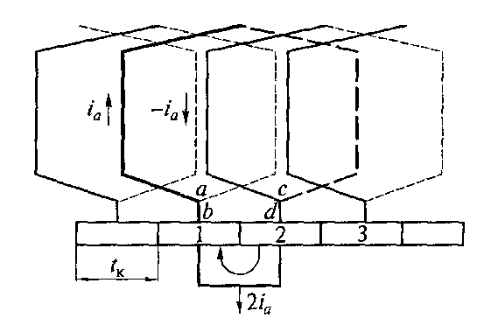



Рис. 1.22. Образование реактивного тока коммутации.

Наличие положительного тока $i_к$ замедляет изменение тока в секции и увеличивает плотность тока в сбегающей части щетки. При большой скорости изменения тока в конце периода коммутации суммарная ЭДС $\sum e$ увеличивается, в результате чего $i_к \neq 0$ и $i_с$ $i_к \neq - i_а$. Разрыв цепи с током и повышенная плотность тока могут явиться причиной искрения под сбегающей частью щетки. Если $\sum e$ имеет отрицательное значение, то в начале коммутации составляющие тока $i_к$ и $i_с$ направлены в противоположные стороны. При этом происходит ускорение процесса изменения тока в переключаемой секции, и плотность тока в сбегающей части щетки становится меньше, чем в набегающей. Условия переключения секции в этом случае более благоприятны, чем при положительной $\sum e$, однако при значительной величине ЭДС может возникнуть искрение под щеткой.

**Электродвижущие силы в переключаемой секции.** В области расположения сторон секции существуют магнитный поток, создаваемый током переключаемых секций, и магнитный поток, создаваемый током других проводников и обмоток. При вращении якоря эти потоки наводят в переключаемой секции ЭДС, сумма которых определяет ток короткого замыкания секции. Величина магнитного потока, созданного током переключаемой секции, определяется индуктивностью $L_с$ секции и ее током $i_с$. При изменении тока изменяется также и магнитный поток, и в секции с количеством витков $w_с$ наводится ЭДС

$$e_L = d( L_с i_с) / dt \quad (1.55)$$

Скорость $di_с/dt$ изменения тока от $+i_а$ до $-i_а$ в течение времени $T_к$ отрицательна (рис. 1.23),

поэтому $e_L$ имеет положительное значение, так как $L_c$ всегда больше нуля. Следовательно, ЭДС $e_L$ замедляет изменение тока в переключаемой секции. Среднюю скорость изменения тока в секции за период $T_п$ коммутации от начального значения $+i_a$ до конечного значения $-i_a$ можно записать как

$$(di_c/dt)_{ср} = -(2i_a / T_к) \quad (1.56)$$

Току $+i_a$ соответствует магнитный поток обмотки возбуждения $Ф_{0\ в}$. Среднее значение ЭДС самоиндукции секции:

$$E_L = w_c (2Ф_{ов} / T_к) \quad (1.57)$$

При постоянной индуктивности секции:

$$E_L = 2L_c i_a / T_к \quad (1.58)$$

В каждом пазу якоря обычно размещены стороны нескольких секций, которые пронизывает общий магнитный поток. При полном шаге обмотки (или небольшом его укорочении) соседние щетки одновременно переключают секции, стороны которых размещены в верхнем и нижнем слоях одного паза. Таким образом, в рассматриваемой секции будет наводиться ЭДС взаимной индукции вследствие изменения магнитного потока, вызванного изменением тока в другой секции, переключаемой соседней щеткой. При вращении якоря проводники переключаемой секции пересекают неподвижный поток якоря, и в них наводится ЭДС, направление которой совпадает с направлением тока в начале переключения секции. Следовательно, ЭДС, обусловленные потоком якоря, замедляют процесс изменения тока в секции. Если в воздушном зазоре над сторонами переключаемой секции магнитная индукция, обусловленная поперечной составляющей МДС обмотки якоря, равна $B_{ояq}$, то ЭДС, наводимая в секции под действием $B_{ояq}$, определяется по формуле:
$e_{ояq} = 2B_{ояq}w_c lv$. В зоне коммутации кроме потока якоря может присутствовать магнитный поток главных полюсов (при смещении токораздела с геометрической нейтрали) или же поток добавочных полюсов. При вращении якоря проводники переключаемой секции пересекают этот поток, и в них наводится ЭДС, величина которой определяется по формуле $e_к = 2B_к w_c lv$, где $w_c$ – число витков секции; $l$ – длина активной части проводника секции, м; $v$ – линейная скорость проводника, м/с.

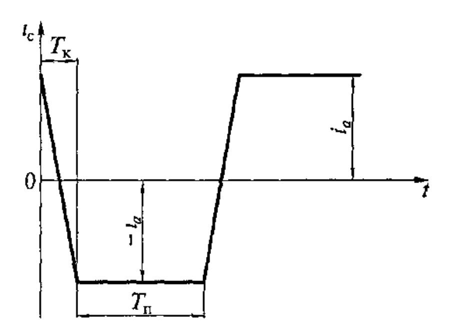



Рис. 1.23. График изменения тока в секции обмотки якоря при коммутации.

Индукция $B_к$ в воздушном зазоре над сторонами переключаемой секции обусловлена МДС главного или добавочного полюса. Направление ЭДС $e_к$ зависит от направления магнитного потока и направления вращения якоря и определяется по правилу правой руки.

**Средства уменьшения ЭДС в переключаемой секции.** Если МДС обмотки возбуждения $F_{ов}$ направлена встречно МДС обмотки якоря $F_о$ то $\sum e$ может быть значительно меньше суммы $e_{ояq} + e_р$ за счет противоположно направленной ЭДС $e_к$. При этом изменение тока в переключаемой секции приближается к линейному. Две МДС – индуктора и якоря – на одном участке магнитной цепи (в воздушном зазоре) создают результирующую магнитную индукцию $B_к$ в месте расположения сторон переключаемой секции. В этом случае:

$$e_{рк} = 2w_c lv \sum B_к \quad (1.59)$$

где $e_{рк}$ – реактивная ЭДС в коммутируемой секции, В. Реактивная ЭДС $e_р$ в течение периода коммутации не остается постоянной. Для секций, занимающих разное положение по ширине

пазов, форма изменения $e_р$ неодинакова, поэтому уравновесить ее мгновенное значение с помощью ЭДС $e_{рк}$ не представляется возможным. Обычно ограничиваются равенством средних значений этих ЭДС или небольшим превышением $e_{рк}$ над $e_к$. При работе машины в режиме генератора направление тока в секции в начале периода коммутации совпадает с направлением ЭДС параллельной ветви обмотки якоря, поэтому для получения коммутационной ЭДС необходимо расположить переключаемую секцию в зоне действия главного полюса противоположной полярности, т.е. сместить токораздел с геометрической нейтрали в направлении вращения якоря путем смещения в этом направлении щеток. При работе машины в режиме двигателя для получения коммутирующей ЭДС необходимо сместить токораздел с геометрической нейтрали в направлении, противоположном направлению вращения якоря. МДС главных полюсов при последовательном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря изменяется пропорционально току якоря. Поэтому ЭДС $e_{рк}$ увеличивается с увеличением нагрузки так же, как и ЭДС $e_р$. Благодаря этому в машинах с последовательным возбуждением при одном и том же положении щеток можно получить удовлетворительную коммутацию в широком диапазоне изменения нагрузки. В машинах с параллельным и смешанным возбуждением для уравновешивания реактивной ЭДС $e_р$ следовало бы смещать щетки в соответствии с нагрузкой. Однако для удобства обслуживания щетки устанавливаются в положение геометрической нейтрали. Поэтому при малых нагрузках изменение тока в переключаемой секции получается ускоренным, а при больших нагрузках – замедленным. При изменении направления вращения якоря необходимо также изменить положение щеток относительно геометрической нейтрали. В настоящее время описанный способ уменьшения реактивной ЭДС в переключаемой секции применяется только в машинах малой мощности, предназначенных для одного направления вращения. Основным средством уравновешивания реактивной ЭДС в переключаемой секции является установка добавочных полюсов между главными полюсами. Токораздел в этом случае совпадает с геометрической нейтралью. Полярность добавочных полюсов должна быть такой же, как ранее установленная полярность главных полюсов в зоне коммутации, т.е. при работе в режиме генератора за главным полюсом по вращению якоря следует добавочный полюс противоположной полярности, а в режиме двигателя – добавочный полюс той же полярности. Для соблюдения пропорциональности между нагрузкой машины и магнитным потоком добавочных полюсов необходимо обмотку полюсов включить последовательно с обмоткой якоря и магнитную цепь выполнить ненасыщенной. Индукция в магнитной цепи не должна превышать 1,2 Тл при номинальной нагрузке. Это относится также к результирующей магнитной индукции на общих участках магнитной цепи главных и добавочных полюсов, где их МДС складываются. МДС добавочных полюсов $F_д$ должна уравновесить МДС обмотки якоря, создать необходимую индукцию $\sum B_к$ в зоне коммутации и быть направлена противоположно $B_{рк}$. При отсутствии компенсационной обмотки первая составляющая МДС добавочных полюсов равна поперечной МДС обмотки якоря при расположении токораздела на геометрической нейтрали. Вторая составляющая представляет собой МДС, необходимую для проведения потока по магнитной цепи добавочных полюсов. При ненасыщенной магнитной цепи МДС $\sum F$ всей магнитной цепи машины можно принять равной МДС двух воздушных зазоров $2\delta_д$ между якорем и добавочными полюсами. Для уменьшения влияния насыщения стальных участков магнитной цепи добавочных полюсов в машинах небольшой мощности зазор $\delta_д$ делают почти в 2 раза больше по сравнению с зазором между якорем и главными полюсами $\delta_0$. В крупных машинах при шинах при большом зазоре $\delta_д$ возможно искажение распределения индукции $\sum B_к$ магнитодвижущей силой главных полюсов. Поэтому зазор $\delta_д$ делают почти равным зазору между якорем и главным полюсом $\delta_0$, а для линейности характеристики намагничивания цепи добавочных полюсов ставят прокладки из немагнитного материала между добавочными полюсами и станиной.

Контрольные вопросы

1. Как определить направление ЭДС, индуцируемой в проводнике?

2. Как определить направление силы, возникающей в проводнике с током, помещенном в магнитное поле?
3. Какой паз называется элементарным?
4. Каковы условия симметрии обмотки якоря?
5. Как производится выбор обмотки якоря?
6. В каких случаях применяются сложные обмотки якоря?
7. Какие причины вызывают искрение щеток на коллекторе?
8. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.

# Глава 2. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

## 2.1. Основные понятия.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения генераторы постоянного тока (ГПТ) с электромагнитным возбуждением подразделяют на генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. В первом случае независимая (от самого генератора) обмотка возбуждения (НОВ) получает питание от постороннего источника постоянного тока (рис. 2.1, *а*), во втором – питание обмотки возбуждения осуществляется от самого генератора. Генераторы с самовозбуждением, в свою очередь, подразделяют на генераторы:

• параллельного возбуждения (шунтовые), у которых обмотка возбуждения (ШОВ) подключена параллельно обмотке якоря (рис. 2.1, *б*);

• последовательного возбуждения (сериесные), у которых обмотка возбуждения (СОВ) включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 2.1, *в*);

• смешанного возбуждения (компаундные), имеющие две обмотки возбуждения, одна из которых соединена с обмоткой якоря параллельно (ШОВ), а другая – последовательно (СОВ) (рис. 2.1, *г*).

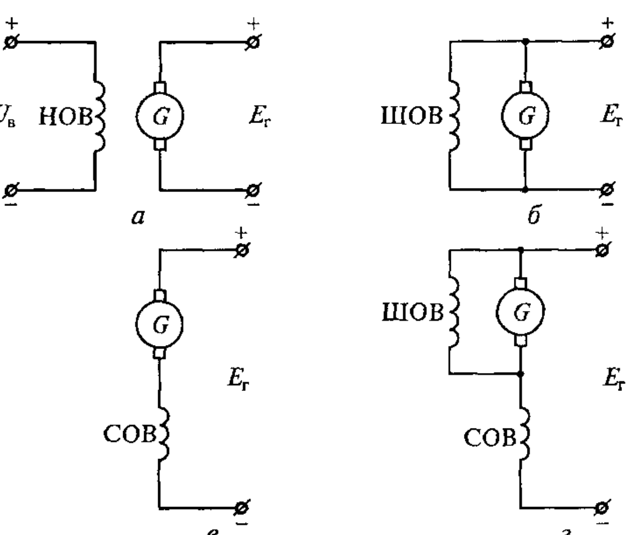



Рис. 2.1. Упрощенные электрические схемы генераторов постоянного тока. независимого (*а*), параллельного (*б*), последовательного (*в*) и смешанного (*г*) возбуждения: G – генератор; НОВ, ШОВ и СОВ – независимая, шунтовая и сериесная обмотки возбуждения соответственно; $E_г$ – ЭДС генератора; $U_в$ – напряжение обмотки возбуждения

Генераторы с возбуждением постоянными магнитами не имеют обмотки возбуждения, так как их главные полюсы изготовляются в виде постоянных магнитов. При работе ГПТ в его якорной обмотке индуцируется ЭДС $E_я$. При подключении к генератору нагрузки в цепи якоря возникает ток, а на выводах генератора устанавливается напряжение:

$$U_г = E_я - I_я R_я \quad (2.1)$$

где $R_я$, – сумма сопротивлений всех участков электрической цепи якоря, Ом. В общем виде

это сопротивление можно представить как: $R_я = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} + r_{сов} + r_щ$ т.е. оно состоит из сопротивлений обмотки якоря $r_{оя}$, обмотки добавочных полюсов $r_{дп}$, компенсационной обмотки $r_{ко}$, последовательной обмотки возбуждения $r_{сов}$ и переходного щеточного контакта $r_щ$. При отсутствии в машине какой-либо из указанных обмоток соответствующие слагаемые из формулы (2.2) нужно исключить. Якорь генератора приводится во вращение первичным двигателем, который создает на валу генератора вращающий момент $M_1$. Если генератор работает в режиме холостого хода ($I_я = 0$), то для вращения его якоря нужен сравнительно небольшой момент, называемый *моментом холостого хода* $M_0$. Этот момент затрачивается на преодоление трения в подшипниках, трения щеток о коллектор, трения вращающихся частей о воздух. При работе нагруженного генератора в проводниках обмотки якоря появляется ток $i_а = I_я / 2a$. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем главных полюсов машины на каждый проводник обмотки якоря действует сила:

$$F_{эм} = В_{ср} l i a \quad (2.3)$$

где $В_{ср}$ – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; $l$ – активная длина якоря, м. Определив по правилу левой руки направление этой силы, видим, что создаваемый ею электромагнитный момент $M_{эм}$ направлен против вращающего момента первичного двигателя $M_1$. Величина электромагнитного момента

$$M_{эм} = F_{эм} ND/2 = В_{ср} l i_a ND/2 \quad (2.4)$$

где $N$ – число активных проводников в обмотке якоря; $D$ – наружный диаметр якоря, м. Имея в виду, что $i_а = I_я/2а$, $\pi D = 2p\tau$, а полезный магнитный поток возбуждения $\Phi = В_{ср} l\tau$ (см. рис. 1.15, а), получим: $M_{эм} = B_{ср} lN (I_я / 2a) \times (2p\tau / 2\pi) = \Phi I_я (pN / 2a\pi)$ (2.5)

или где $с_м = pN / 2a\pi$ величина, постоянная для данной машины. При неизменной частоте вращения ($n$ = const) вращающий момент первичного двигателя $M_1$ уравновешивается суммой противодействующих моментов: моментом холостого хода $M_{хх}$ и электромагнитным моментом $M_{эм}$: $M_1 = M_{хх} + M_{эм}$ (2.7)

Полученное выражение представляет собой уравнение моментов для генератора при $n$ = const. Режим работы электрической машины, в котором она должна нормально функционировать в течение всего срока службы, называется *номинальным режимом* работы. Этот режим характеризуется номинальными величинами: номинальной мощностью $P_{ном}$, номинальным напряжением $U_{ном}$, номинальным током $I_{ном}$ и номинальной частотой вращения $n_{ном}$. Номинальная мощность генератора постоянного тока представляет собой полезную электрическую мощность на выводах машины, выраженную в ваттах, киловаттах или мегаваттах. Помимо указанных величин, номинальными называются и другие величины, если они соответствуют номинальному режиму работы машины. Генераторы обычно работают при неизменной частоте вращения $n$, поэтому все характеристики строятся при условии $n$ = const. Основными характеристиками генераторов являются:

• характеристика холостого хода – зависимость ЭДС на выходе генератора $E_г$ от тока возбуждения $I_в$ в режиме холостого хода: $E_г = f(I_в)$ при $I_н = 0$ и $n$ = const;

• нагрузочная характеристика – зависимость напряжения на выходе генератора $U_г$ от тока возбуждения $I_в$ при работе с нагрузкой: $U_г = f(I_в)$ при $I_н \neq 0$ и $n$ = const;

• внешняя характеристика – зависимость напряжения на выходе генератора $U_v$ от тока нагрузки $I_н$: $U_г = f(I_н)$ при $R_{рг}$ = const и $n$ = const;

• регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока нагрузки $I_н$ при неизменном напряжении на выходе генератора: $I_в = f(I_н)$ при $U_г$ = const и $n$ = const.

## 2.2. Генератор независимого возбуждения.

Схема включения генератора независимого возбуждения показана на рис. 2.2. Ток $I_в$ в обмотке возбуждения, а следовательно, и величина основного магнитного потока машины регулируются реостатом $R_{рг}$, включенным в цепь обмотки возбуждения, питаемой от внешнего источника постоянного тока. Это может быть аккумулятор, выпрямитель или другой генератор постоянного тока, называемый в этом случае возбудителем. При снятии

*характеристики холостого хода* $E_г = f(I_в)$ генератор работает с разомкнутой цепью нагрузки ($I_н = 0$). Установив номинальную частоту вращения и поддерживая ее неизменной в течение всего опыта, постепенно увеличивают ток $I_в$ в обмотке возбуждения от нуля до значения $I_в = I_{в\ max}$, при котором напряжение холостого хода $U_г = 1{,}15\ U_{ном}$. Прямолинейная часть характеристики соответствует ненасыщенной магнитной системе машины. При дальнейшем увеличении тока $I_в$ магнитная система машины насыщается, и характеристика приобретает криволинейный характер. Характеристика холостого хода $E_г = f(I_в)$ совпадает по форме с характеристикой намагничивания (см. рис. 1.17) и позволяет судить о магнитных свойствах машины. Нагрузочная характеристика генератора выражает зависимость напряжения $U_г$ на выводах генератора от тока возбуждения $I_в$ при неизменном токе нагрузки $I_н$, например номинальном, и номинальной частоте вращения. При указанных условиях напряжение на выводах генератора $U_г$ меньше его ЭДС $E_1$, поэтому нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода. Уменьшение $U_г$ при наличии нагрузки объясняется двумя причинами: падением напряжения в цепи якоря (см. формулу (2.1) и размагничивающим влиянием якоря.

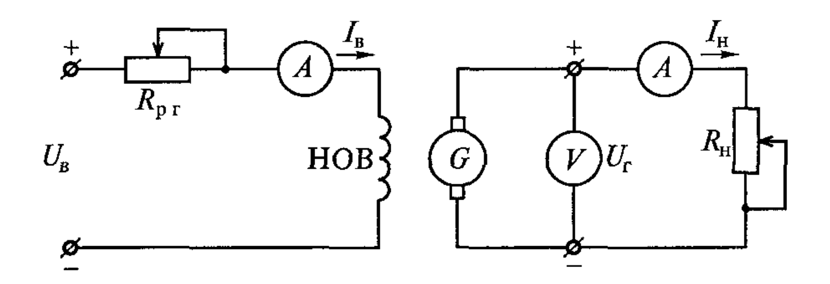



Рис. 2.2. Схема включения генератора независимого возбуждения.
$R_н$ - сопротивление нагрузки.

Измерив суммарную величину активного сопротивления цепи обмотки якоря $R_я$ и подсчитав падение напряжения $I_яR_я$ можно определить ЭДС генератора при заданном токе нагрузки:

$$E_г = U_г + I_яR_я \quad (2.8)$$

Внешняя характеристика генератора представляет собой зависимость напряжения $U_г$ на выводах генератора от тока нагрузки $I_н$. При снятии данных для построения внешней характеристики устанавливают номинальную частоту вращения генератора и увеличивают ток нагрузки до номинального значения при номинальном напряжении. Затем, постепенно уменьшая нагрузку до нуля ($I_н = 0$), снимают показания приборов. Сопротивление цепи возбуждения $R_{рг}$ и частоту вращения в течение опыта поддерживают неизменными. Внешняя характеристика генератора отражает изменение тока возбуждения $I_в$. При увеличении тока нагрузки $I_н$ напряжение $U_г$ понижается в результате размагничивающего влияния реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря. Наклон внешней характеристики к оси абсцисс (жесткость внешней характеристики) оценивается номинальным изменением напряжения генератора,%, при сбросе нагрузки: $\Delta U_{ном} = (E_г - U_{ном} / U_{ном}) \times 100$ (2.9)

Обычно для генераторов независимого возбуждения $\Delta U_{ном}$ = 5...10%. *Регулировочная характеристика* генератора $I_в = f(I_н)$ показывает, как следует изменять величину тока в цепи обмотки возбуждения, чтобы при изменениях нагрузки генератора напряжение на его выводах оставалось неизменным и равным номинальному. При этом частота вращения сохраняется постоянной: $n$ = const. Порядок построения регулировочной характеристики следующий. При отключенной нагрузке устанавливают такой ток возбуждения $I_{в0}$, при котором напряжение на выводах генератора равно номинальному. Затем постепенно увеличивают ток нагрузки генератора до номинального значения, одновременно увеличивая ток возбуждения таким образом, чтобы напряжение генератора во всем диапазоне изменения нагрузки оставалось равным номинальному. Так получают восходящую ветвь характеристики. Далее, постепенно уменьшая нагрузку генератора до холостого хода и

регулируя соответствующим образом ток возбуждения, получают нисходящую ветвь характеристики. Нисходящая ветвь регулировочной характеристики располагается выше восходящей, что объясняется влиянием остаточного намагничивания магнитной цепи машины в процессе снятия восходящей ветви. Среднюю кривую, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями, называют практической регулировочной характеристикой генератора. Основным недостатком генераторов независимого возбуждения является необходимость в постороннем источнике постоянного тока – возбудителе. Однако возможность регулирования напряжения в широких пределах, а также сравнительно жесткая внешняя характеристика являются несомненными достоинствами таких генераторов, что объясняет преимущественное использование их на тяговом подвижном составе.

### 2.3. Генератор параллельного возбуждения.

Принцип самовозбуждения генераторов постоянного тока основан на том, что магнитная система машины, будучи намагниченной, сохраняет небольшой магнитный поток остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины $Ф_{ост}$ (2...3% от полного потока). Самовозбуждение генератора проводят в режиме холостого хода. При вращении якоря поток $Ф_{ост}$ индуцирует в якорной обмотке ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в обмотке возбуждения возникает небольшой ток $I_в$. Если МДС обмотки возбуждения $I_в w_в$ имеет такое же направление, как и поток $Ф_{ост}$, то она увеличит поток главных полюсов. Это, в свою очередь, вызовет увеличение ЭДС генератора и очередное увеличение тока возбуждения. Так будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора не будет уравновешено падением напряжения в цепи возбуждения, т. е. когда $I_в R_в = E_г$, На рис. 2.3 показана схема включения генератора параллельного (шунтового) возбуждения. Характеристика холостого хода этого генератора аналогична характеристике холостого хода генератора независимого возбуждения. Самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей некоторое значение, называемое критическим ($n_{кр}$).

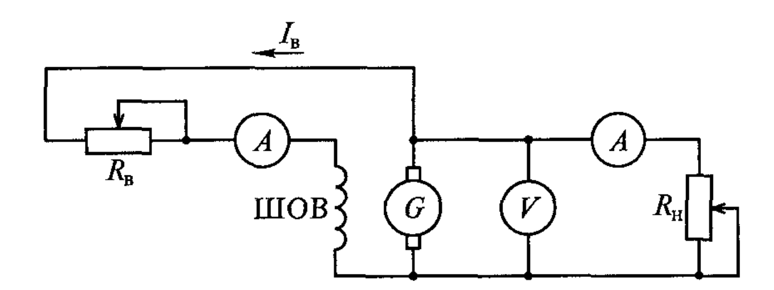



Рис. 2 3. Схема включения генератора параллельного возбуждения.
$R_в$ – регулировочное сопротивление обмотки возбуждения.

Это условие вытекает из характеристики самовозбуждения генератора, представляющей собой зависимость напряжения генератора в режиме холостого хода от частоты вращения при неизменном сопротивлении цепи возбуждения $E_г = f(n)$ при $R_в = \text{const}$. Анализ характеристики самовозбуждения показывает, что в области малых частот вращения ($n < n_{кр}$) увеличение частоты вращения сопровождается незначительным увеличением напряжения. Объясняется это тем, что при $n < n_{кр}$ процесс самовозбуждения еще не наступил и появление напряжения $U_0$ обусловлено лишь остаточным намагничиванием магнитной цепи генератора. Процесс самовозбуждения начинается при $n > n_{кр}$. В этом случае увеличение частоты вращения сопровождается резким увеличением ЭДС $E_г$. Однако при частоте вращения, близкой к номинальной, рост ЭДС несколько замедляется, что объясняется магнитным насыщением генератора. Таким образом, самовозбуждение генераторов постоянного тока возможно при соблюдении следующих условий:

• магнитная система машины должна иметь остаточный магнетизм;

• включение обмотки возбуждения должно быть таким, чтобы ее магнитный поток совпадал по направлению с потоком остаточного магнетизма $Ф_{ост}$;
• сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического;
• частота вращения якоря должна быть больше критической.

Нагрузочная и регулировочная характеристики генератора параллельного возбуждения практически не отличаются от соответствующих характеристик генератора независимого возбуждения. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения менее жесткая, чем у генератора независимого возбуждения. Объясняется это тем, что в генераторе параллельного возбуждения помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря), действует еще одна причина – уменьшение тока возбуждения в результате снижения напряжения от действия первых двух причин. Этим же объясняется и то, что при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки $R_н$ ток $I_н$ увеличивается лишь до критического значения $I_{кр}$, а затем, при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки, ток $I_н$ начинает уменьшаться, а при коротком замыкании $I_{кз} < I_{кр}$. Дело в том, что с увеличением тока $I_н$ увеличивается размагничивание генератора (в результате усиления реакции якоря и уменьшения тока возбуждения) и машина переходит в ненасыщенное состояние, при котором даже небольшое уменьшение сопротивления нагрузки вызывает резкое уменьшение ЭДС $E_г$ машины. Величина тока нагрузки $I_н$ определяется напряжением на выводах генератора $U_г$ и сопротивлением нагрузки $R_н$. Поэтому при токах нагрузки $I_н < I_{кр}$, когда напряжение генератора уменьшается медленнее, чем убывает сопротивление нагрузки, происходит рост тока нагрузки. После того как ток нагрузки достигнет критического значения ($I_н = I_{кр}$), дальнейшее уменьшение $R_н$ сопровождается уменьшением тока $I_н$, так как в этом случае напряжение генератора $U_г$ убывает быстрее, чем уменьшается $R_н$. Короткое замыкание, вызванное постепенным уменьшением сопротивления нагрузки, неопасно для генератора параллельного возбуждения. Но при внезапном коротком замыкании магнитная система генератора не успевает сразу размагнититься, и ток $I_{кз}$ достигает опасных для машины значений $(8...12)I_{ном}$. При таком резком увеличении тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, переходящее в круговой огонь. Генераторы параллельного возбуждения широко используют в качестве источников постоянного напряжения вагонов, так как отсутствие возбудителя выгодно отличает их от генераторов независимого возбуждения. Колебание напряжения генератора параллельного возбуждения (см. формулу 2.9) составляет 10... 30%.

## 2.4. Генератор последовательного возбуждения.

У генератора последовательного (сериесного) возбуждения (рис. 2.4) ток возбуждения равен току нагрузки ($I_в = I_н$), поэтому свойства этого генератора определяются лишь внешней характеристикой (рис. 2.5). Все остальные характеристики генератора могут быть сняты только при переключении генератора на независимое возбуждение. Это объясняется тем, что при холостом ходе ЭДС генератора невелика ($E_г = E_{ост}$), поскольку при разомкнутой цепи якоря ток в обмотке возбуждения отсутствует. С появлением нагрузки в обмотке возбуждения появляется ток $I_в = I_н$, и напряжение генератора повышается, растет ток в цепи нагрузки, увеличивается магнитный поток полюсов и происходит дальнейший рост напряжения и тока в цепи якоря. Напряжение $U_г$ увеличивается вплоть до наступления насыщения магнитной системы машины. При дальнейшем увеличении $I_н$ напряжение генератора понижается, так как основной поток генератора из-за насыщения магнитной системы остается неизменным, в то время как реакция якоря и падение напряжения в цепи якоря увеличиваются.

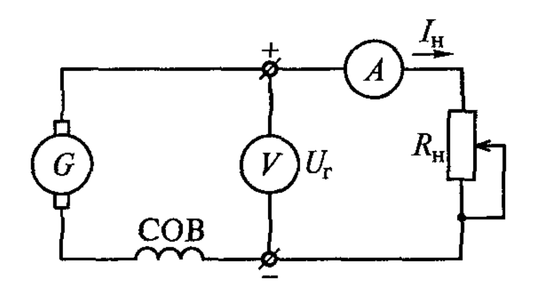



Рис. 2.4. Схема включения генератора последовательного возбуждения.

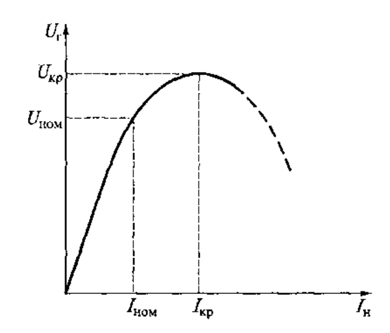



Рис. 2.5. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения.
$U_г = f(I_н)$

В результате внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения имеет падающий характер. Вследствие значительной зависимости напряжения от тока нагрузки и плохой управляемости генераторы последовательного возбуждения применяются крайне редко (например, в сварочных машинах и иногда при реостатном торможении локомотивов).

### 2.5. Генераторы смешанного возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения (рис. 2.6) имеет две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную. При согласном включении обмоток возбуждения их МДС складываются, что обеспечивает получение жесткой внешней характеристики генератора. В режиме холостого хода генератор имеет только параллельное возбуждение, так как $I_н = I_я = 0$. С появлением тока нагрузки возникает МДС последовательной обмотки возбуждения, которая подмагничивает машину и при этом полностью компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. Внешняя характеристика при согласном включении обмоток является наиболее жесткой; напряжение на зажимах генератора при увеличении нагрузки остается почти неизменным. В тех случаях, когда требуется, чтобы напряжение на зажимах потребителя (в конце линии) во всем диапазоне нагрузок оставалось практически неизменным, число витков последовательной обмотки возбуждения увеличивают настолько, чтобы МДС этой

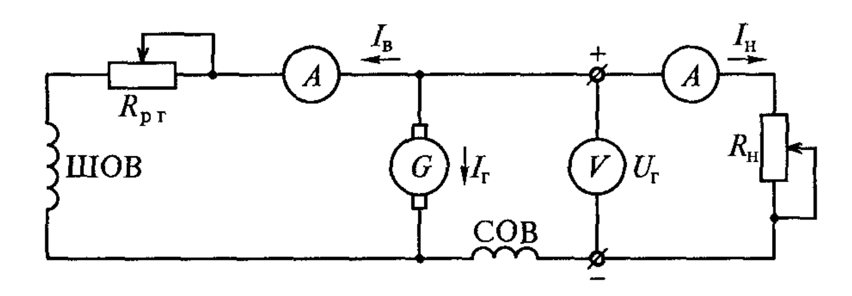



Рис. 2.6. Схема включения генератора смешанного возбуждения.

обмотки компенсировала еще и падение напряжения в проводах линии. Однако такая мера возможна только для заранее оговоренных случаев. Генераторы с согласным включением обмоток возбуждения применяются для питания силовой нагрузки во всех случаях, когда требуется постоянство напряжения в линии при резких изменениях тока нагрузки. При встречном включении обмоток возбуждения напряжение генератора $U_г$ с ростом тока нагрузки $I_н$ резко уменьшается. Это объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, МДС которой направлена встречно МДС параллельной обмотки. Встречное включение обмоток применяется лишь в генераторах специального назначения, например в сварочных генераторах, где круто падающая внешняя характеристика защищает генератор от коротких замыканий в линии. Кроме того, встречное включение обмоток практикуется в специальных генераторах возбуждения (возбудителях тяговых генераторов тепловозов), формирующих требуемую характеристику управляемой электрической машины.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики определяют свойства генераторов постоянного тока?
2. Какие моменты действуют в генераторах постоянного тока?
3. Что такое «встречное» и «согласное» включение обмоток возбуждения?
4. Назовите области применения генераторов независимого возбуждения.
5. Почему генераторы последовательного возбуждения имеют ограниченное применение?
6. Укажите причины использования генераторов смешанного возбуждения в сварочных генераторах.

# Глава 3. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

## 3.1. Основные понятия.

Для электродвигателя – привода вспомогательного оборудования, работающего с постоянной скоростью вращения, можно составить уравнение ЭДС:

$$U = E_я + I_я R_я \quad (3.1)$$

Таким образом, подведенное к двигателю напряжение уравновешивается противо ЭДС якорной обмотки $E_я$ и падением напряжения в цепи якоря. На основании уравнения (3.1) можно получить формулу для определения тока якоря:

$$I_я = U - E_я / R_я \quad (3.2)$$

Умножив обе части уравнения (3.1) на ток якоря $I_я$, получим уравнение мощности:

$$UI_я = E_я I_я + I^2_я R_я \quad (3.3)$$

где $UI_я$ – мощность в цепи обмотки якоря, Вт; $I^2_я R_я$ – мощность электрических потерь в цепи якоря, Вт. Для выяснения сущности произведения $E_я I_я$ выполним следующее преобразование формулы (2.5) с учетом формул (1.4) и (1.35):

$$E_я I_я = (pN / 60a) \times \Phi n I_я = (pN / 60a) \times (60\omega / 2\pi) \times I_я \quad (3.4)$$

или

$$E_я I_я = (pN / 60a\pi) \times \Phi I_я \omega \quad (3.5)$$

Известно, что

$$pN / 60a\pi \times \Phi I_я = M \quad (3.6)$$

тогда

$$E_я I_я = M\omega = P_{эм} \quad (3.7)$$

где $\omega = 2n\pi / 60$ угловая скорость вращения якоря, $с^{-1}$, $P_{эм}$ – электромагнитная мощность двигателя, кВт. Следовательно, произведение $E_я U_я$ представляет собой электромагнитную мощность двигателя, численно равную той части мощности на входе двигателя, которая в процессе его работы преобразуется в механическую мощность, необходимую для вращения якоря. Преобразовав уравнение (3.3) с учетом уравнения (3.7), получим:

$$UI_я = M\omega + I_я R_я. \quad (3.8)$$

С увеличением нагрузки на вал двигателя, т.е. с увеличением электромагнитного момента $M_{эм}$, возрастает мощность в цепи обмотки якоря $UI_я$ – мощность на входе двигателя. Но так как напряжение, подводимое к двигателю, поддерживается неизменным ($U$ = const), то

увеличение нагрузки двигателя сопровождается ростом тока в обмотке якоря $I_я$. В зависимости от способа возбуждения двигатели постоянного тока подразделяют на двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические) и с электромагнитным возбуждением. Последние, в соответствии со схемой включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря, подразделяют на двигатели параллельного (шунтовые), последовательного (сериесные) и смешанного (компаундные) возбуждения. На вал двигателя действуют следующие моменты:

• вращающий (электромагнитный) момент $M_{эм}$, который приводит якорь двигателя во вращение, передаваемое через вал исполнительному механизму;

• момент холостого хода $M_{хх}$, обусловленный механическими (включая вентиляционные) и магнитными потерями в двигателе. Величина момента $M_{хх}$ не зависит от нагрузки, и в двигателях нормального исполнения она не превышает 2...6% от номинального значения вращающего момента $M_{ном}$;

• полезный момент $M_2$, т.е. противодействующий момент механизма, приводимого в действие данным двигателем;

• динамический момент $M_д$, возникающий при всяком изменении частоты вращения якоря двигателя и обусловленный инерцией вращающихся частей двигателя и нагрузки. Динамический момент определяют по формуле:

$$M_д = J\,(d\omega / dt) \quad (3.9)$$

где $J$ – момент инерции всех вращающихся частей двигателя и нагрузки, кг×м$^2$, приведенный угловой скорости вращения ω.

Обычно моменты $M_{хх}$ и $M_2$ рассматривают совместно как статический момент сопротивления вращению вала двигателя:

$$M_{хх} + M_2 = M_{ст} \quad (3.10)$$

В общем случае уравнение моментов двигателя может быть записано как

$$M_{эм} = M_{хх} + M_2 \pm M, \quad (3.11)$$

или

$$M_{эм} = M_{ст} \pm M_д. \quad (3.12)$$

Знак «+» или «-» у динамического момента определяется характером изменения скорости: при увеличении скорости момент $M_д$ складывается с моментом $M_{ст}$ (знак «+»), а при уменьшении скорости $M_д$ действует встречно моменту $M_{ст}$ (знак «-»). При неизменной скорости вращения якоря ($d\omega/dt = 0$) динамический момент $М_д = 0$, тогда уравнение моментов двигателя упростится: $M_{эм} = M_{хх} + M_2 = M_{ст}$, (3.13)

т.е. в установившемся режиме работы вращающий момент двигателя и статический момент сопротивления на его валу взаимно уравновешиваются. Вращающий момент двигателя пропорционален электромагнитной мощности, поэтому:

$$M_{эм} = P_{эм} /\omega = P_{эм} / (2n\pi / 60) = 60P_{эм} / 2n\pi = 9{,}55P_{эм} / n \quad (3.14)$$

Величина полезного момента двигателя $M_2$ пропорциональна мощности двигателя $P_2$ что дает возможность получить выражение для определения полезного момента, аналогичное выражению (3.14):

$$M_2 = 9{,}55P_2 / n \quad (3.15)$$

где $M_2$ – полезный момент, Нм; $P_2$– полезная мощность двигателя (мощность на валу), Вт; $n$ – частота вращения якоря, об/мин. На основании формулы для определения ЭДС $E_я = c_e\Phi n$, тогда частота вращения якоря двигателя:

$$n = E_я / c_e\Phi n \quad (3.16)$$

Подставив в выражение (3.16) значение $E_я$ из формулы (3.1), получим

$$n = U - I_я R_я / c_e\Phi \quad (3.17)$$

где $c_e$ – электрическая постоянная машины. Таким образом, частота вращения якоря электродвигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения. Физически это объясняется тем, что увеличение напряжения $U$ или уменьшение потока Ф вызывает увеличение разности ($U$- $E_я$), что, в свою очередь, ведет к увеличению тока $I_я$ (см. формулу 3.2). Возросший ток $I_я$ увеличивает вращающий момент, и если при этом нагрузочный момент остается неизменным, то частота вращения якоря двигателя тоже увеличивается.

Следовательно, регулировать частоту вращения якоря двигателя можно, изменяя:
• напряжение $U$.
• магнитный поток возбуждения Ф.
• величину сопротивления якорной цепи $R_я$.

Направление вращения якоря определяется направлением магнитного потока возбуждения Ф и направлением тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление того или другого, можно изменить направление вращения якоря. Следует иметь в виду, что переключение общих зажимов схемы у рубильника не дает изменения направления вращения якоря, так как при этом одновременно изменяется направление тока и в обмотке якоря, и в обмотке возбуждения. При исследовании работы двигателей постоянного тока большое значение имеет зависимость частоты вращения якоря от вращающего момента $M_{эм} = M_{xx} + M_2$. Эта зависимость графически выражается механической характеристикой двигателя n $=f(M_{xx})$ при $U$= const и $R_{рг}$ = const. Преобразуем выражение (3.17):

$$n = (U / c_е Ф) - (I_я R_я / c_е Ф) \quad (3.18)$$

и, подставив из формулы (2.6) значение тока $I_я = M_{эм} R_я / c_е c_м Ф^2$ получим:

$$n = U / (c_е Ф - M_{эм} R_я / c_е c_м Ф^2) \quad (3.19)$$

где $c_м$ – электромашинная постоянная двигателя. Из формулы (3.19) видно, что на рабочие характеристики двигателя существенно влияет способ возбуждения. Двигатель работает устойчиво, и якорь вращается с постоянной скоростью, если развиваемый им вращающий момент равен противодействующему моменту сопротивления:

$$M_{эм} = M_{ст} \quad (3.20)$$

Условие устойчивой работы двигателя формулируется следующим образом: при возрастании частоты вращения якоря прирост вращающего момента должен быть меньше прироста противодействующего момента: $dM_{эм} / dn < dM_{ст} / dn$ (3.21)

Обычно для выполнения этого условия необходимо, чтобы увеличение частоты вращения якоря двигателя сопровождалось уменьшением вращающего момента.

### 3.2. Двигатель параллельного возбуждения.

Схема включения в сеть двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 3.1. Реостат в цепи обмотки возбуждения $R_{рг}$ служит для регулирования частоты вращения якоря двигателя. Так, при уменьшении сопротивления реостата увеличивается ток в обмотке возбуждения $I_в$, а следовательно, возрастает поток Ф, что согласно формуле (3.17) вызывает уменьшение частоты вращения якоря. При увеличении $R_{рг}$ частота вращения якоря увеличивается. Зависимость частоты вращения от величины тока возбуждения выражается *регулировочной характеристикой двигателя*: $n = f(I_в)$ при $I$ = const и $U$ = const.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимость частоты вращения $n$, тока $I$, полезного момента $M_2$, вращающего момента $M_{эм}$ от мощности на валу двигателя $P_2$ при $U$ = const и $I_в$ = const (рис. 3.2). Для анализа зависимости $n = f(P_2)$, которая называется скоростной характеристикой, используем формулу (3.17). Из этой формулы видно, что при неизменном напряжении f/на частоту вращения якоря влияют два фактора: падение напряжения в цепи якоря $I_я R_я$ и поток возбуждения Ф. При увеличении нагрузки уменьшается числитель в формуле (3.17), а вследствие увеличения реакции якоря уменьшается знаменатель. Обычно ослабление потока, вызванное реакцией якоря, невелико, и первый фактор влияет на частоту вращения сильнее, чем второй. В итоге частота вращения якоря с ростом нагрузки уменьшается. Если же усиление реакции якоря в двигателе сопровождается более значительным ослаблением потока Ф и $M_{эм}$ то частота вращения с увеличением нагрузки будет возрастать (пунктирная кривая на рис. 3.2). Однако такой характер зависимости $n = f(P_2)$ нежелателен, так как не удовлетворяет условию устойчивой работы двигателя (см, выражение 3.21).

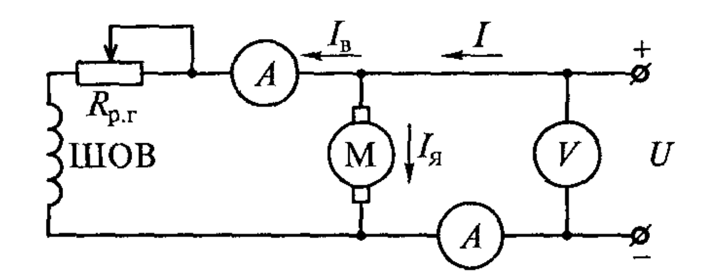



Рис. 3.1. Схема включения двигателя параллельного возбуждения.

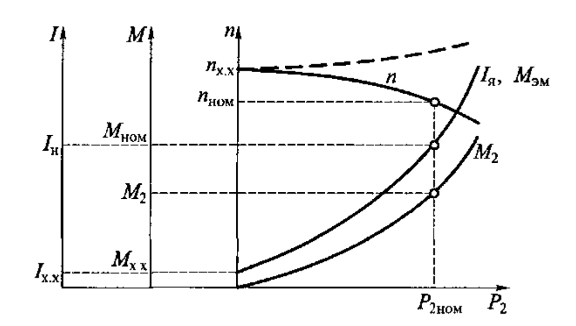



Рис. 3.2. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения.

Чтобы скоростная характеристика имела вид падающей кривой, в некоторых двигателях параллельного возбуждения применяют легкую (с небольшим числом витков) последовательную обмотку возбуждения, которая называется *стабилизирующей обмоткой*. При согласном включении этой обмотки с параллельной обмоткой возбуждения ее МДС компенсирует размагничивающее действие реакции якоря так, что поток Ф во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменным. Изменение частоты вращения якоря при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называется номинальным изменением скорости:

$$\Delta n = (n_{хх} - n_{ном} / n_{ном})\times 100 \quad (3.22)$$

где $n_{хх}$ – частота вращения двигателя в режиме холостого хода, об/мин; $n_{ном}$ - номинальная частота вращения двигателя, об/мин. Обычно для двигателей параллельного возбуждения $\Delta n$ = 2...8%, поэтому скоростную характеристику двигателя параллельного возбуждения называют жесткой. Зависимость полезного момента $M_2$ от нагрузки отражена в формуле (3.15). При $n$ = const график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой. Однако с увеличением нагрузки частота вращения якоря снижается, поэтому зависимость $M_2 = f(P_2)$ имеет нелинейный характер. Согласно формуле (3.13), при $n$ = const вращающий момент двигателя $M_{эм} = M_{хх} + M_2$. Так как рабочие характеристики двигателя строятся при условии $I_в$ = const, что обеспечивает постоянство магнитных потерь в двигателе, то момент холостого хода тоже постоянен, т.е. $M_{хх}$ = const. Поэтому графики $M_{эм} = f(P_2)$ и $M_2 = f(P_2)$ проходят параллельно. Если принять поток Ф = const, то график $M_2 = f(P_2)$ является также выражением зависимости $I = f(P_2)$ поскольку $M_{эм} = c_м \Phi I_я$ (см. выражение 3.19). Если пренебречь реакцией якоря, то так как $I_в$ = const, можно принять Ф = const. Тогда механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой линию с небольшим наклоном к оси абсцисс. Угол наклона тем больше, чем больше величина сопротивления, включенного в цепь якоря. Механическая характеристика двигателя при отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря называется *естественной*, а при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря ($R_я + r_д$) – *искусственной*. Устойчивость частоты вращения якоря и возможность ее плавной регулировки в широких пределах обеспечили двигателям параллельного возбуждения широкое применение на подвижном составе.

### 3.3. Двигатель последовательного возбуждения.

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря (рис. 3.3), поэтому магнитный поток Ф обмотки возбуждения зависит от тока якоря $I_я$. При небольших нагрузках магнитная система машины ненасыщена, и потому изменение магнитного потока от тока якоря прямо пропорционально $Ф = KI_я$, где $K$– коэффициент пропорциональности. В этом случае выражение для определения электромагнитного момента можно записать как:

$$M_{эм} = (c_м K I_я) I_я = c'_м I^2_я \quad (3.23)$$

Подставив выражение (3.23) в выражение для частоты вращения (3.19), получим:

$$n = U - I_я R_я / c'_м I^2_я = U - I_я R_я / c'_м I^2_я \quad (3.24)$$

Таким образом, вращающий момент двигателя при ненасыщенном состоянии магнитной системы пропорционален квадрату тока якоря, а частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки.

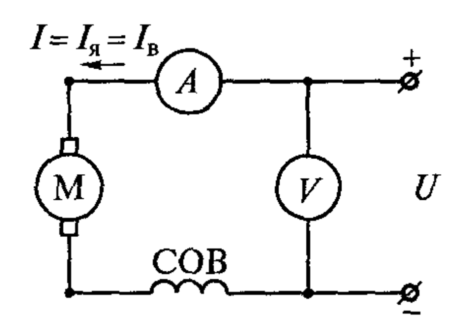



Рис. 3.3. Схема включения двигателя последовательного возбуждения.

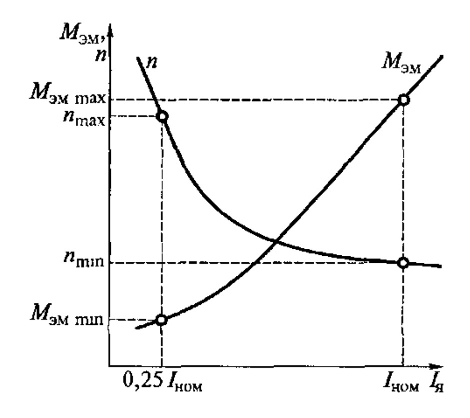



Рис. 3.4. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения.

На рис. 3.4 представлены механические характеристики $M_{эм} = f(I_я)$ и $n = f(I_я)$ двигателя последовательного возбуждения. При больших нагрузках наступает насыщение магнитной системы двигателя. В этом случае магнитный поток при увеличении нагрузки практически не изменяется, и характеристика двигателя $M_{эм} = f(I_я)$ приобретает линейный характер. Как видим, скоростная характеристика $n = f(I_я)$ двигателя последовательного возбуждения является *мягкой*, поскольку частота вращения якоря резко меняется при изменении нагрузки. Следует иметь в виду, что при уменьшении нагрузки частота вращения якоря резко увеличивается – двигатель идет в «разнос». Поэтому работа двигателя последовательного возбуждения, а также его пуск при отсутствии нагрузки на валу недопустимы. В качестве меры безопасности вал двигателя последовательного возбуждения должен быть жестко соединен с рабочим механизмом посредством муфты или зубчатой передачи. Применение ременной передачи недопустимо, так как при обрыве или сбросе ремня может произойти «разнос» двигателя. Свойство двигателя развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока якоря, имеет существенное значение, особенно в тяжелых

условиях пуска и при перегрузках, так как при постепенном увеличении нагрузки двигателя мощность на входе растет медленнее, чем его вращающий момент. Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой пусковой момент обусловило их широкое применение в качестве тяговых на тепловозах, электровозах и в различных подъемных устройствах. Номинальное изменение частоты вращения якоря,%, последовательного возбуждения определяется по формуле:

$$\Delta n_{ном} = (n(0{,}25) - n_{ном} / n_{ном}) \times 100 \quad (3.25)$$

где (0,25) - частота вращения при нагрузке двигателя, составляющей 25% от номинальной, об/мин; $n_{пом}$ – частота вращения якоря при номинальной нагрузке, об/мин. Регулировать частоту вращения якоря двигателя последовательного возбуждения можно двумя способами: изменением напряжения питания $U$ и изменением магнитного потока Ф обмотки возбуждения.

## 3.4. Двигатель смешанного возбуждения.

Двигатель смешанного возбуждения нашел наибольшее распространение в качестве привода агрегатов. Он имеет две обмотки возбуждения: параллельную (ШОВ) и последовательную (СОВ) (рис. 3.5). Частота вращения вала этого двигателя определяется по выражению (3.18) с учетом того, что: $Ф = Ф_1 \pm Ф_2$, где $Ф_1$ и $Ф_2$ – соответственно потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения, Вб. Знак «+» соответствует согласному включению обмоток возбуждения (МДС обмоток складываются). В этом случае с увеличением нагрузки общий магнитный поток машины увеличивается (за счет потока последовательной обмотки $Ф_2$), что ведет к уменьшению частоты вращения якоря. При встречном включении обмоток поток $Ф_2$ при увеличении нагрузки размагничивает машину (знак «-»), что, наоборот, увеличивает частоту вращения. Работа двигателя при этом становится неустойчивой, так как с увеличением нагрузки частота вращения неограниченно возрастает. Однако при небольшом числе витков последовательной обмотки с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем диапазоне нагрузок остается практически неизменной. Механические характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения (рис. 3.6) в сравнении с механическими характеристиками двигателя последовательного возбуждения имеют более жесткую характеристику.

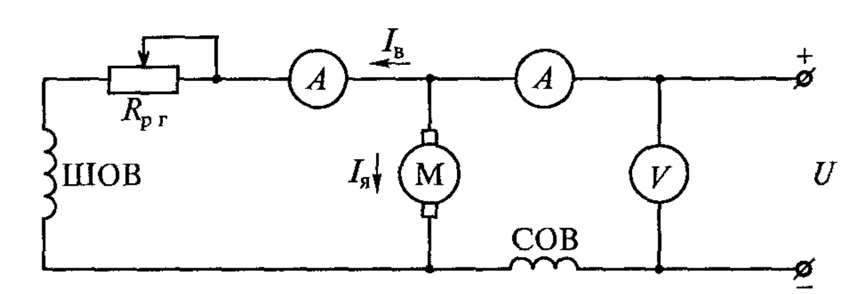



Рис. 3.5. Схема включения двигателя смешанного возбуждения.

Двигатель смешанного возбуждения имеет ряд преимуществ по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Например, этот двигатель может работать вхолостую, так как поток параллельной обмотки Ф ограничивает частоту вращения якоря в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Регулирование частоты вращения осуществляется реостатом $R_{рг}$ в цепи параллельной обмотки возбуждения. Однако наличие двух обмоток возбуждения увеличивает стоимость изготовления двигателя смешанного возбуждения по сравнению с двигателями предыдущих типов, что ограничивает его применение.

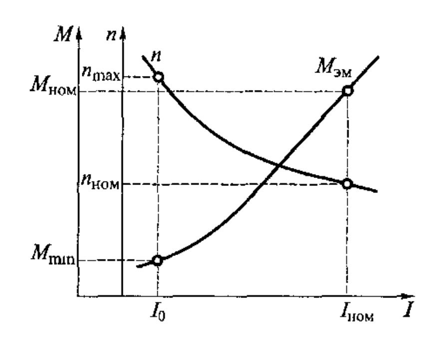



Рис. 3.6. Рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения.

### 3.5. Торможение двигателей постоянного тока.

При необходимости быстрой остановки или уменьшения скорости вращения якоря применяют его электродинамическое торможение. Если внешний момент на валу двигателя становится вращающим, то частота вращения становится больше пограничной скорости $n_{xx}$. При этом ЭДС $E_я$ начинает превышать напряжение сети $U$. В этом случае ток якоря $I_я$ изменяет свое направление, и машина переходит в генераторный режим. Электромагнитный момент машины также меняет свое направление и становится тормозящим по отношению к внешнему моменту, действующему на вал машины. Величина тормозного момента регулируется током возбуждения. При электродинамическом торможении обмотку якоря двигателя отключают от сети и замыкают на нагрузочное сопротивление $R_н$. При этом механическая энергия вращающихся масс преобразуется в электрическую энергию, которая, в свою очередь, расходуется на нагрев сопротивления $R_н$ и других элементов цепи якоря. Ток якоря при динамическом торможении меняет свое направление на противоположное, а создаваемый им электромагнитный момент оказывает тормозящее действие на подвижные части приводного механизма. При динамическом торможении двигателей последовательного возбуждения во избежание размагничивания машины необходимо переключать обмотку возбуждения для того, чтобы направление тока в ней при переходе на динамическое торможение осталось неизменным. Торможение противовключением (контрток) применяется при необходимости интенсивного торможения. Сущность его состоит в том, что путем изменения направления тока в обмотке возбуждения либо в обмотке якоря меняют направление электромагнитного момента двигателя, и он становится тормозящим. Обычно торможение противовключением предшествует изменению направления вращения якоря (реверсированию). Однако на практике такой режим работы электрической машины может вывести ее из строя.
Контрольные вопросы
1. Назовите отличительные признаки работы машин постоянного тока в режимах генератора и двигателя.
2. Укажите способы регулирования частоты вращения якоря электродвигателя.
3. Как производится реверсирование двигателей постоянного тока?
4. Проведите сравнение характеристик двигателей с различными схемами питания обмотки возбуждения.

## Глава 4. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.
### 4.1. Принцип действия и устройство асинхронных двигателей.

**Конструкция.** Среди электрических двигателей первое место по своему распространению занимают трехфазные асинхронные двигатели. Не менее 95% всех электродвигателей переменного тока, применяемых в разных отраслях промышленности, принадлежат именно к этому классу. Как и электрические машины постоянного тока, асинхронные электродвигатели обратимы и могут работать как в режиме двигателя, так и в режиме

генератора. Неподвижный стальной кольцеобразный сердечник вместе с уложенной в его пазах многофазной обмоткой носит название *статора*. В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя – *ротор,* который состоит из вала, сердечника и обмотки. Обмотка ротора (рис. 4.1) состоит из алюминиевых стержней 1, расположенных в пазах сердечника и замкнутых с обоих торцов алюминиевыми кольцами 2. Принцип действия асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора, образуемого многофазным (обычно трехфазным), током, с токами, наводимыми в обмотке ротора. В результате чередования фаз тока в неподвижно расположенных обмотках статора создается результирующий, постоянный по величине магнитный поток, вращающийся в пространстве с частотой $n_1$ соответствующей частоте тока. Частота вращения ротора зависит от частоты напряжения питания, величины нагрузки и числа пар полюсов на статоре. В результате взаимодействия индуцированного тока с магнитным потоком создается момент, противодействующий причине возникновения этого тока. В данном случае ток вызывается относительным перемещением потока и ротора. Следовательно, возникающий момент стремится уменьшить относительную скорость магнитного поля и ротора и вращает ротор в направлении вращения поля. Однако частота вращения ротора всегда меньше частоты вращения поля, так как только при этом условии ротор пересекается вращающимся полем и в нем индуцируется ток.

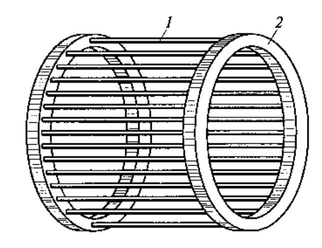



Рис 4.1. Короткозамкнутая обмотка ротора («беличья клетка»)
1 – стержень, 2 – кольцо.

Принцип действия двигателя основан на отставании частоты вращения магнитного поля ротора от частоты вращения поля статора, что обусловило появление термина асинхронный, т.е. неодновременный. Асинхронные двигатели часто называются также индукционными, поскольку они работают на том же принципе, что и индукционные приборы (трансформаторы). Вращающееся поле статора пересекает проводники (стержни) обмотки ротора и наводит в них ЭДС, под действием которой в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора протекает относительно большой ток. На проводник обмотки ротора действует электромагнитная сила $F_{пр}$, направление которой совпадает с направлением вращения поля статора (рис. 4.2). Совокупность сил $F_{пр}$, приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент $M_{эм}$ вращающий ротор с частотой $n_2$. Вращение ротора передается через вал исполнительному механизму. Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора, зависят от порядка чередования фаз питающего напряжения. При необходимости изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя следует поменять местами любую пару фазных выводов, соединяющих двигатель с сетью.

**Частота вращения.** За основу принимается двухполюсная система, создаваемая тремя витками, или катушками, взаимно сдвинутыми в пространстве на 120°. За один период переменного тока двухполюсное магнитное поле делает один оборот, а за одну минуту – $60f$ оборотов, где $f$ – частота тока. При стандартной частоте $f = 50$ Гц частота вращения поля $n = 60 \times 50 = 3000$ об/мин. При числе полюсов больше двух необходимо различать механическую и электрическую угловые скорости вращения поля. Электрическая угловая скорость $\omega = 2\pi f$ не зависит от числа катушек и числа полюсов статорной обмотки. Механическая угловая скорость $\omega_1 = 2\pi fn / 60$, т.е. обратно пропорциональна числу пар

полюсов магнитного поля. Действительно, при числе $p$ пар полюсов имеется $3p$ витков, или катушек, сдвинутых взаимно на $2\pi/3p$, или $360^{o}/3p$. За один период переменного тока результирующий магнитный поток переместится в пространстве на часть окружности, занимаемую тремя соседними катушками, принадлежащими трем разным фазам, т.е. на $2\pi/p$, или $360°/p$.

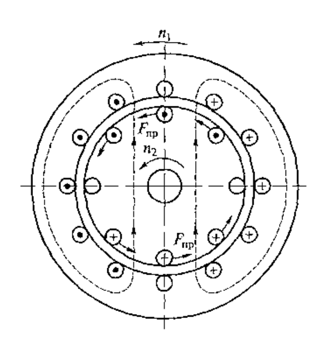



Рис. 4.2. Принцип работы асинхронного двигателя.

Очевидно, что в этом случае угловая скорость вращения поля равна:

$$\omega_1 = 2\pi f / p \quad (4.1)$$

а число оборотов магнитного поля в минуту составляет:

$$n = 60f / p \quad (4.2)$$

Таким образом, при частоте питающего напряжения $f = 50$ Гц в двухполюсной машине $n_1$ = 3000 об/мин, четырехполюсной $n_1$= 1500 об/мин, шестиполюсной $n_1$ = 1000 об/мин, в восьмиполюсной $n_1$ = 750 об/мин и т.д. Обозначим через $n$ частоту вращения ротора. Отношение $s = n_1 - n_2 / n_2$ называется скольжением. Для асинхронных двигателей скольжение является основным фактором, определяющим условия работы машины. Частота вращения ротора:

$$n = n_1(1 - s) = 60\, f\,(1 - s) / p \quad (4.3)$$

Для эффективной работы двигателя необходимо поддерживать величину $s < 0{,}04$. В результате частота вращения ротора двигателя будет незначительно отличаться от частоты вращения поля статора. Например, при s = 0,04 частота вращения вала четырехполюсного двигателя составит 1440 об/мин.

**Обмотка статора асинхронного двигателя. Как** и первичная обмотка трансформатора, эта обмотка выполняет две функции. Во-первых, она создает МДС и, таким образом, играет роль обмотки возбуждения машин постоянного тока. Во-вторых, обмотка статора передает электрическую энергию ротору, в котором эта энергия преобразуется в механическую энергию вращения. Для лучшего использования поверхности статора и получения наибольшего магнитного потока обмотка статора распределяется по всей внутренней поверхности кольцеобразного сердечника статора. Простейшая трехфазная однослойная четырехполюсная обмотка статора в разрезе показана на рис. 4.3, а на рис. 4.4 приведена ее схема в развернутом виде. Обмотка состоит из 12 проводников (или сторон секций), соответственно пронумерованных на обоих рисунках. Каждый проводник располагается в соответствующем пазу в сердечнике статора. Если при одной паре полюсов вся окружность статора соответствует 360 эл. град., то при двух парах полюсов ($p$ = 2) 360 эл. град, соответствуют половине окружности, т. е. двойному полюсному делению 2τ. Начала обмоток фаз *A*, *B* и *C*, соединенные с внешней сетью, должны располагаться на расстоянии 120 эл. град, друг от друга. Шаг обмотки, т.е. расстояние между соседними проводниками по ходу обмотки, равен полюсному шагу т, т.е. в данном случае соответствует 180 эл. град. Концы обмоток, обозначенные на рис 4.4 буквами *X*, *Y* и *Z*, соединяются либо в звезду, либо в треугольник. В данном случае применено соединение в звезду, т.е. концы обмоток объединены в общую нулевую точку схемы. Для определения направления токов в проводниках обмотки необходимо задаться каким-либо моментом времени, например

соответствующим положению векторов токов трех фаз *A*, *B* и *C*. В этот момент времени ток в первой фазе положителен, т.е. направлен от начала *A* к концу *X*, в остальных двух фазах токи отрицательны, т.е. направлены от концов *Y* и *Z* к началам *B* и *C*. Все проводники разбиваются на ($2p = 4$) группы с одинаковым направлением тока в каждой группе. Таким образом, создается четыре ветви магнитного потока и четыре полюса, зоны которых показаны пунктирными линиями на рис. 4.3, а сами полюса – пунктирными линиями на рис. 4.4. Магнитные силовые линии замыкаются по стальным сердечникам статора и ротора, причем условно считаем, что силовые линии, выходящие из статора, образуют северные полюсы, а входящие в статор – южные. В группе проводников с одинаковым направлением тока среднее место занимает проводник той фазы, ток которой в данный момент времени имеет максимальное значение (на рис. 4.4 это первая фаза *A*). По мере вращения векторов *A*, *B*, *C* картина распределения токов изменяется, а вместе с этим происходит изменение положения магнитного поля, т. е. его вращение. В действительности речь идет не об отдельных проводниках, а о катушках, состоящих из многих витков. Катушки в свою очередь разбиваются на секции, располагаемые в отдельных пазах.

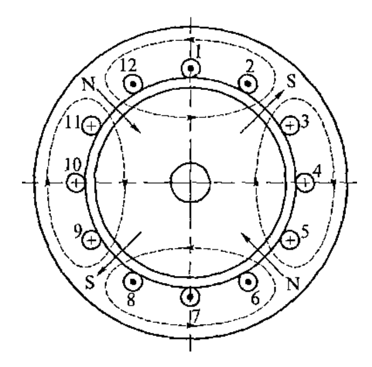



Рис. 4.3. Простейшая четырехполюсная машина переменного тока.

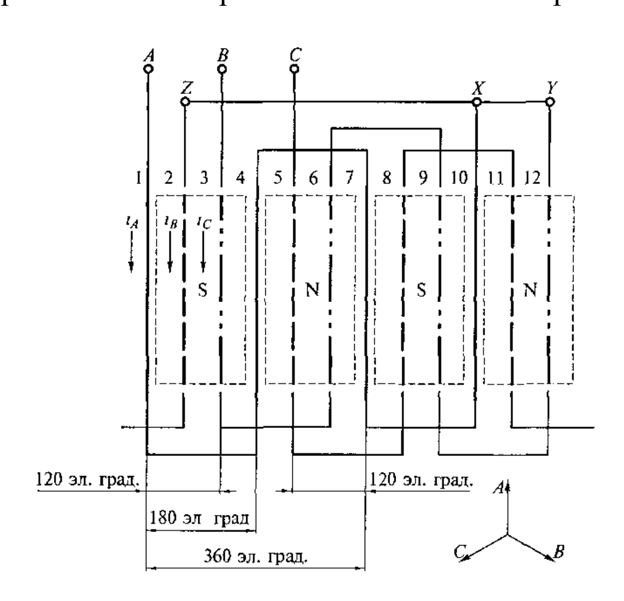



Рис. 4.4. Развертка обмотки статора простейшей четырехполюсной машины переменного тока.

Показанная на рис. 4.4 обмотка соответствует минимально возможному числу пазов, так как на каждый полюс и на каждую фазу приходится только один паз. Такая обмотка выполнена в один паз на полюс и фазу. Обычно применяется несколько пазов на полюс и фазу. Если обозначить через $Z_1$ общее число пазов статора, $m_1$ - 3 – число фаз и $g_1$ – число пазов на полюс и фазу, тогда получим:

$$Z_1 = 2pm_1g_1 = 6pg_1 \quad (4.4)$$

В настоящее время в основном применяются двухслойные обмотки, когда в каждом пазу располагаются две стороны секций, принадлежащие к разным катушкам: одна сторона каждой секции лежит в верхнем слое, а вторая – в нижнем слое в другом пазу. Выводы фазных обмоток подключаются к зажимам на щитке двигателя. Три начала и три конца обмоток располагаются в два ряда, причем против зажима начала одной фазы находится зажим конца соседней фазы. Обмотки могут быть соединены либо в звезду, либо в треугольник в зависимости от напряжения питающей сети. Например, один и тот же двигатель, рассчитанный на фазное напряжение (т.е. на напряжение каждой фазы своей обмотки), может быть соединен в звезду при линейном напряжении 380 В и в треугольник – при линейном напряжении 220 В.

**Ротор асинхронного двигателя.** В качестве простейшего ротора может быть применен сплошной стальной цилиндр, служащий одновременно и магнитопроводом, и токопроводом. Однако двигатели с таким ротором имеют низкий коэффициент полезного действия и низкий cos φ. Индуцируемые в роторе токи с одной стороны участвуют в создании момента вращения, а с другой стороны, при их циркуляции в роторе выделяется теплота согласно закону Джоуля–Ленца. Необходимо разработать конструкцию ротора, обеспечивающую увеличение механического эффекта и уменьшение теплового эффекта индуцированных токов. С этой целью нужно сосредоточить токи как можно ближе к цилиндрической поверхности ротора с тем, чтобы увеличить плечо электромагнитных сил. В то же время выгодно, чтобы внутренняя часть ротора имела в осевом направлении наибольшее сопротивление, поскольку циркулирующие вихревые токи превращают электрическую энергию в тепловую. Для достижения указанной цели цилиндрический сердечник ротора набирается так же, как и статор, из тонких стальных листов, изолированных друг от друга. Для протекания индуцированных токов в пазах близ внешней поверхности ротора укладываются медные или алюминиевые проводники – стержни. Все стержни соединены между собой двумя замыкающими кольцами, расположенными с обоих торцов сердечника. Такой ротор называется *короткозамкнутым*. Стержни, расположенные вдоль цилиндрической поверхности, вместе с короткозамкнутыми кольцами образуют так называемую *беличью клетку*. Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (их часто называют просто короткозамкнутыми двигателями) получили широкое распространение на подвижном составе благодаря исключительной простоте, дешевизне и надежности в работе.

### 4.2. Электродвижущие силы статора и ротора.

При синусоидальном распределении постоянного по величине вращающегося магнитного потока в воздушном зазоре асинхронной машины в обмотке ротора индуцируется ЭДС, изменяющаяся во времени по синусоиде. То же относится и к обмотке статора, проводники которого также пересекаются вращающимся магнитным потоком. Если ЭДС изменяется синусоидально, то ее мгновенное значение, как известно из теории переменных токов, равно $e = E_m \sin\omega t$. Амплитуда ЭДС в одном витке обмотки равна $E_m = \Phi_m\omega$, где $E_m$ – максимальное значение ЭДС. Если обмотка расположена в нескольких пазах, то ЭДС, индуцируемые в отдельных проводниках обмотки одной фазы, лежащих в разных пазах, будут отличаться по фазе. Поэтому полная ЭДС в обмотке одной фазы равна геометрической сумме ЭДС отдельных проводников. То же относится и к определению ЭДС одного витка, или катушки, при так называемом укорочении шага, когда шаг обмотки меньше полюсного шага машины.
Введя коэффициент $k_1$ меньший единицы, зависящий от устройства обмотки и называемый обмоточным коэффициентом, можно записать:

$$E_1 = 4{,}44\, k_1 \Phi f w_1$$

где $E_1$ – ЭДС фазы, В; Ф – магнитный поток обмотки статора, Вб; $f$– частота питающей сети, Гц; $w_1$– число витков обмотки фазы статора. Обмоточный коэффициент зависит от типа и схемы статорной обмотки и в среднем примерно равен 0,9. ЭДС статорной обмотки

уравновешивается приложенным к обмотке статора напряжением сети. По отношению к току статора эта ЭДС является противодействующей. ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора, определяется относительной частотой вращения поля и ротора $\omega_2 = 2\pi fs = s\omega_1$. Таким образом, можно записать:

$$e = E_m \sin\omega_2 t = E_m \sin(s\omega_1 t) \quad (4.5)$$

Значение магнитного потока Ф, входящее в уравнения, есть магнитный поток взаимной индукции, охватывающий обе обмотки –- статорную и роторную. Для действующего значения ЭДС в обмотке ротора при скольжении $s$ мы аналогично получим $E_{2s} = 4{,}44 k_2 \Phi f_2 w_2 = 4{,}44 k_2 \Phi f w_2 s$. Как и в трансформаторе, при определении магнитного потока Ф токов ротора и статора исходной величиной является ток во вторичной цепи, т.е. в роторе асинхронного двигателя. Величина роторного тока определяется нагрузкой машины, причем в данном случае речь идет о механической нагрузке, т.е. о моменте на валу двигателя. С увеличением момента на валу вращение ротора замедляется, разность частоты вращения поля и ротора увеличивается, в соответствии с чем возрастают ЭДС и ток в роторе.

### 4.3. Вращающий момент асинхронного двигателя.

Направление силы механического взаимодействия между проводниками ротора и вращающимся магнитным полем показано на рис. 4.5. Однако этот рисунок изображает только небольшой участок обмотки ротора; если же мы рассмотрим всю поверхность ротора с распределенной на нем обмоткой, то картина окажется более сложной.

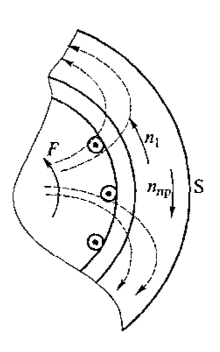



Рис. 4.5. Направление силы механического взаимодействия
между вращающимся полем статора и проводниками ротора

Допустим, что магнитное поле вращается с частотой $n_1$ против часовой стрелки. В рассматриваемый момент времени результирующий магнитный поток занимает показанное на рисунке положение, т.е. в данной зоне магнитные линии входят в статор из ротора (полюс S статора). Согласно правилу правой руки для определения направления ЭДС, индуцируемой в проводниках ротора, необходимо принять во внимание направление движения проводников относительно магнитного поля. Очевидно, что относительное движение проводников ротора с частотой $n_{пр}$ направлено встречно движению поля, т.е. в данном случае по часовой стрелке. Применив для этого случая правило правой руки, найдем, что в проводниках ротора ЭДС направлена в сторону читателя (знак точки). Ток в этих проводниках направлен в ту же сторону. Согласно правилу левой руки механическая сила $F$, действующая на проводники ротора, вызывает вращение ротора в направлении вращения поля. Очевидно, что когда против рассматриваемых проводников ротора окажется полюс N статора, направление ЭДС и тока в проводниках ротора изменится на обратное. Частота этих перемен зависит от разности: $n_1 - n = sn_1$ .Частота тока в роторе: $f_2 = sf$. Например, при $s$ = 0,04 частота тока в роторе $f_2 = 0{,}04 \times 50 = 2$ Гц. На рис. 4.6 показан двухполюсный ротор с распределенной по всей окружности короткозамкнутой обмоткой, состоящей из 12 стержней или проводников. Магнитный поток вращается против часовой стрелки, т. е. ось магнитного потока направлена от $A$ к $B$. Направления ЭДС, индуцируемых в роторе магнитным потоком,

определенные по правилу правой руки, показаны значками в внешнем ряду, ближе к поверхности ротора. Эти направления в точности соответствуют направлению вектора магнитной индукции. Максимальные (по абсолютной величине) значения магнитной индукции и ЭДС соответствуют проводникам 4 и 10, находящимся на линии *AB*.

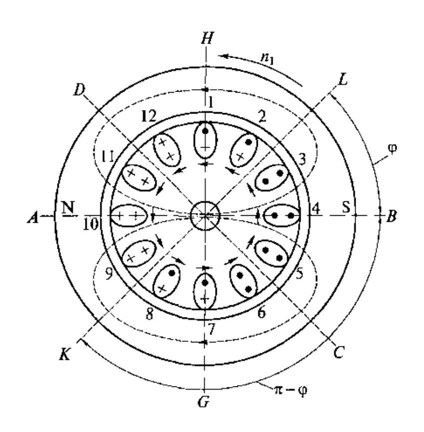



Рис. 4.6. Механизм образования механической силы
и вращающего момента в асинхронном двигателе

Вследствие индуктивного характера сопротивления обмотки ротора ЭДС и ток ротора сдвинуты по фазе на угол φ. Определяя по правилу левой руки механические силы, действующие на проводники ротора, мы видим, что не на все проводники эти силы действуют в направлении вращения поля, как это следует из элементарного принципа действия асинхронного двигателя (рис. 4.7). Это утверждение действительно только для тех проводников, в которых направление тока совпадает с направлением ЭДС. В общем случае, при достаточно большом числе проводников, можно сказать, что механическая сила действует по направлению поля в зоне, соответствующей углу π - φ, и против направления поля в зоне угла φ. Это показано соответствующими стрелками на рис. 4.7. Границы зон определяются прямыми *HG* и *LK*, перпендикулярными к прямым *AB* и *CD*. При большем числе полюсов участки с противоположным направлением силы будут чередоваться чаще, но общая сумма геометрических углов, соответствующих тому или иному направлению силы, останется такой же. После определения средней силы или среднего вращающего момента, действующего на проводники ротора, можно перейти к определению момента машины. Имеем следующие исходные выражения для магнитного потока Φ, тока ротора $I_2$ и коэффициента мощности cosφ:

$$\Phi = E_1 / 4{,}44 k_1 w_1;\ I_2 = sE_1 / \sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2};\ \cos\varphi = r_2 / \sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2} \quad (4.6)$$

где $r_2$ и $x_2$ - соответственно активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, Ом. Вращающий момент:

$$M = c_{м} \Phi I_2 \cos\varphi \quad (4.7)$$

где $c_{м}$ – величина, постоянная для данной машины. Подставив в уравнение (4.7) выражения для Φ, $I_2$ и cosφ из (4.6), получим:

$$М = E^2_1 s r_2 c_{м} / 4{,}44 k_1 f w_1 (r^2_2 + s^2 x^2) \quad (4.8)$$

Обозначив постоянную величину:

$$c_{м} / 4{,}44 k_1 f w_1 = C$$

получим значение номинального момента асинхронного двигателя:

$$M_{ном} = C E_1^2\ (s r^2 / r^2_2 + s^2 x^2_2) \quad (4.9)$$

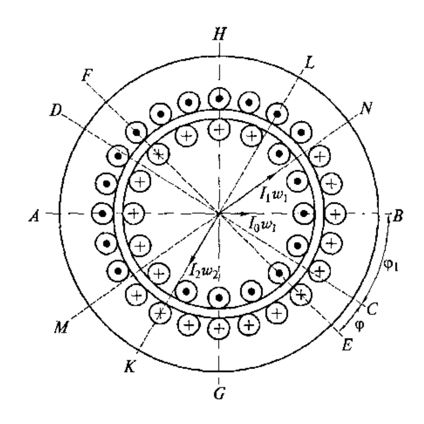



Рис. 4.7. Распределение электромагнитной силы по окружности ротора.

**Механическая характеристика.** Для дальнейшего упрощения анализа примем, что ЭДС статора $E_1$ при изменении $s$ остается постоянной, т.е. пренебрежем изменением падения напряжения в обмотке статора. Однако это возможно только в известных пределах изменения нагрузки, токов и скольжения ротора двигателя, так как при больших значениях $s$ падение напряжения в обмотке статора возрастает, а $E_1$ соответственно снижается. Таким образом, если принять $E_1$ = const, то выражение (4.8) превращается в зависимость $M$ от одной независимой переменной скольжения s, т. е. мы получаем M = $f(s)$, Как видно из графического изображения этой зависимости (рис. 4.8), при малых значениях скольжения преобладает влияние $s$ в числителе формулы, соответственно чему момент двигателя $M$ увеличивается почти пропорционально скольжению. Однако при значениях скольжения, больших некоторого критического значения $s_{кр}$, начинает преобладать влияние слагаемого с $s^2$ в знаменателе формулы (4.8), и момент снижается с увеличением $s$. Наличие максимума на кривой M = $f(s)$ объясняется следующим образом. Если принять Φ = const, то на изменение момента в выражении (4.7) будет влиять $I_2$, который растет с увеличением $s$, и cosφ, который падает с увеличением $s$. Величина угла φ, как видно из рис. 4.6, связана с наличием проводников, в которых электромагнитная сила направлена против вращения поля. Таким образом, с увеличением $s$, т. е. с уменьшением частоты вращения ротора, токи, а следовательно, и электромагнитные силы взаимодействия вращающегося поля статора и тока в отдельных проводниках ротора растут. При малых значениях $s$ и φ момент растет с увеличением тока, однако при значительных величинах $s$ и φ результирующий момент, действующий в направлении вращения поля и ротора, начинает снижаться. Повернув кривую $M = f(s)$ (см. рис. 4.8) на 90° по часовой стрелке, получим механическую характеристику асинхронного двигателя $n = f(M)$ (рис. 4.9). Действительно, если на рис. 4.8 по оси абсцисс отложены значения $s$ от нуля до единицы ($s = 0$ соответствует холостому ходу, а $s_{max} = 1$ – неподвижному состоянию ротора), то на рис. 4.9 нулевое значение на оси ординат соответствует $n = 0$, т. е. $s = 1$, а наибольшая ордината характеристики соответствует $n - n_1$ т. е. $s = 0$. Строго говоря, на холостом ходу двигатель вращается с частотой $n < n_1$ и развивает вращающий момент $M = M_0$, где $M_0$ – момент потерь на трение. Однако, пренебрегая весьма малой величиной $M_0$, можно считать, что на холостом ходу двигатель вращается синхронно с полем.

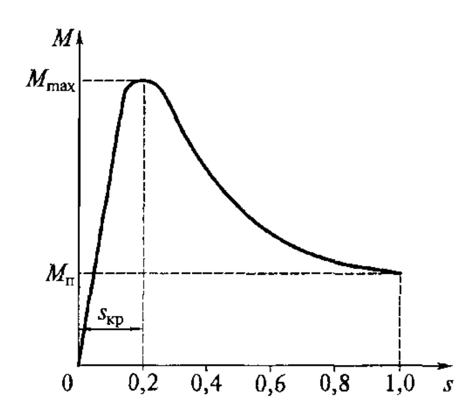



Рис. 4.8. Зависимость вращающего момента $M$ асинхронного двигателя от скольжения $s$
$M_п$ - пусковой момент двигателя

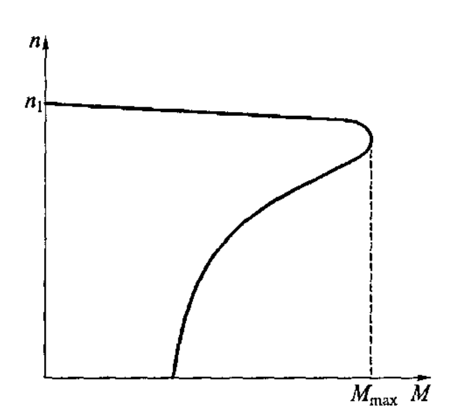



Рис. 4.9. Механическая характеристика асинхронного двигателя:
$n$ – частота вращения ротора; $n_1$ –частота вращения магнитного поля статора.

Сделанные допущения соответствуют равенству вращающего момента двигателя $M$ и момента сопротивления $M_с$, т.е. момента внешней нагрузки, приложенной к валу двигателя. Так как последняя величина является в отношении работы двигателя независимой переменной, то зависимость $n = f(M_с) = f(M)$ отвечает действительным физическим условиям. Эта кривая носит название *механической характеристики* асинхронного двигателя. Механическая характеристика делится на две части: верхняя «устойчивая» часть для значений скольжения от $s = 0$ до $s = s_{кр}$ и нижняя «неустойчивая» часть от $s = s_{кр}$ до $s = 1$. Для устойчивой части действует принцип саморегулирования двигателя. При увеличении нагрузки или момента сопротивления внешних сил частота вращения ротора уменьшается, скольжение увеличивается, растет потребляемый ток, а вместе с тем и вращающий момент, уравновешивая увеличение момента сопротивления. В неустойчивой части увеличение момента внешних сил приводит к уменьшению скорости и одновременно вызывает уменьшение вращающего момента, вследствие чего динамическое равновесие становится невозможным. Поэтому при всяком увеличении момента нагрузки сверх значения $M_{max}$ двигатель сразу останавливается. В связи с этим максимальное значение момента носит название *опрокидывающего.* Отношение максимального момента $M_{max}$ к номинальному $M_{ном}$ характеризует коэффициент перегрузки двигателя $\lambda$. В современных двигателях $\lambda = 2... 2{,}5$, в некоторых двигателях $\lambda > 3$.

**Пусковые характеристики**. Пусковые свойства короткозамкнутых двигателей определяются в первую очередь значением начального пускового момента $M_п$ т.е. момента, соответствующего $n = 0$ и $s = 1$. Этот момент зависит от многих факторов, определяемых расчетом и конструкцией асинхронных двигателей. Отношение пускового момента $M_п$ к номинальному $M_{ном}$, или кратность моментов, изменяется для различных типов двигателей в широких пределах, большей частью от 0,9 до 2. В начале разгона, при небольшой частоте

вращения, вращающий момент уменьшается по сравнению с величиной $M_п$, но это уменьшение незначительно. Двигатели с такими значениями пусковых моментов в большинстве случаев легко преодолевают моменты сопротивления при пуске. Кроме пускового момента большое значение имеет также величина пускового тока. Величина пускового тока ротора $I_{2п}$ (при $s = 1$) значительно превышает величину тока ротора при номинальной нагрузке (при $s = s_{ном}$). Пропорционально возрастанию тока ротора при увеличении скольжения растет ток статора. Отношение пускового тока статора $I_п$ к номинальному току статора $I_{ном}$ колеблется обычно в пределах от 5 до 7 и называется коэффициентом кратности пускового тока. Большой пусковой ток не представляет опасности, так как время протекания пускового процесса составляет от малых долей секунды до нескольких секунд. За такой малый промежуток времени большой пусковой ток не может вызвать значительного повышения температуры двигателя. Более существенным является влияние пускового тока на напряжение сети. Если от одного и того же источника питается много двигателей, причем мощность каждого отдельного двигателя составляет небольшую часть от всей установленной мощности, то падение напряжения, вызванное пусковым током одного двигателя, не может существенно отразиться на напряжении всей сети. Только при наличии двигателей большой мощности (20... 25% от мощности питающего источника) падение напряжения, вызванное пуском такого двигателя, может стать недопустимым. Из сказанного следует, что в большинстве случаев для двигателей малой и средней мощности естественные пусковые условия, характеризуемые коэффициентами кратности пусковых тока и момента, являются допустимыми. Поэтому чаще всего асинхронные двигатели не нуждаются ни в каких особых пусковых устройствах (реостатах и пр.) и начинают работать после включения в сеть. Улучшение пусковых свойств, т.е. увеличение пускового момента и уменьшение пускового тока, может быть достигнуто путем изменения конструкции обмотки ротора благодаря использованию проводников ротора с большим активным сопротивлением в виде узких и высоких стержней (двигатели с глубоким пазом) или в виде двух концентрически расположенных «беличьих клеток». В случае тяжелых пусковых условий, а именно, при необходимости получения большого пускового момента для быстрого разгона под полной нагрузкой, а также при большой частоте пусковых операций, применяют асинхронные двигатели с фазным ротором (с контактными кольцами).

### 4.4. Потери и КПД асинхронного двигателя.

Потери в асинхронных двигателях делятся на потери в обмотках статора и ротора $P_{об}$ и магнитные потери в стальных сердечниках $P_с$. Потери в обмотках статора и ротора определяются как сумма:

$$P = P_{об1} + P_{об2} = m_1 I^2{}_1 r_1 + m_2 I^2{}_2 r_2 \quad (4.10)$$

Для статора число фаз в обмотке статора $m_1 = 3$, а для короткозамкнутого ротора $m_2 = z_2/p$, где $z_2$ – число пазов ротора; $p$ – число пар полюсов. Следует отметить, что активное сопротивление обмотки статора $r_1$ несколько больше ее сопротивления при постоянном токе, что обусловлено поверхностным эффектом. Это увеличение можно учесть коэффициентом, равным в среднем 1,05; этот коэффициент следует применить и при определении $r_2$ путем подключения обмотки статора к источнику постоянного тока. Что касается сопротивления обмотки ротора $r_2$, то при вращающемся роторе оно такое же, как на постоянном токе, так как частота тока ротора весьма мала. Однако непосредственное измерение этой величины возможно у двигателя с фазовым ротором. Потери в обмотке короткозамкнутого ротора могут быть экспериментально определены лишь косвенным путем. Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи приходятся почти полностью на стальной сердечник статора. В роторе эти потери весьма малы, так как они зависят от частоты тока, которая в роторе составляет лишь несколько процентов от частоты тока статора или сети. Поэтому можно магнитными потерями в роторе пренебречь и учитывать только потери в статоре. Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках и вентиляционных потерь,

а в двигателях с фазным ротором сюда прибавляются еще и потери на трение щеток о контактные кольца. В короткозамкнутых двигателях (без контактных колец) малой и средней мощности с шариковыми подшипниками механические потери малы по сравнению с другими группами потерь.

Определим КПД асинхронного двигателя. Как мы уже говорили, в статоре потери складываются из потерь в обмотке и в стали $P_{об1}$ и $P_с$, поэтому в ротор передается посредством вращающегося магнитного поля мощность $P' = P_п - P_{об1} - P_с$, где $P_п$– подведенная к двигателю мощность. Эта мощность, называемая электромагнитной мощностью двигателя, может быть представлена как произведение вращающего момента электромагнитных сил на угловую скорость вращения поля:

$$P_{эм} = M\omega_1 = M\,(2\pi n_1 / 60) \quad (4.11)$$

С другой стороны, механическая мощность ротора $P_2$, вращающегося со скоростью $n$, равна

$$P2 = M\,(2\pi n_1 / 60) = P'(1 - s),\ поскольку\ n = n_1(1 - s). \ (4.12)$$

Мощность, соответствующая разности между $P'$ и $P_2$, превращается в теплоту, выделяемую в обмотке ротора, т е.

$$P_{об2} = P' - P_2 = P' - P'(1 - s) = P's \quad (4.13)$$

Таким образом, скольжение $s$ является мерой потерь в обмотке ротора, т.е. отношением мощности, теряемой на выделение теплоты в роторе, ко всей электромагнитной мощности, полученной ротором. Очевидно, что при $s = 1$, т. е. при неподвижном двигателе, вся мощность, получаемая ротором, превращается в теплоту. В нормальных условиях работы малая величина $s$ (примерно несколько процентов) является необходимым условием экономичной работы двигателя. Вычитая из мощности $P_2$ механические потери $P_{мх}$, получаем полезную мощность на валу двигателя; $P = P_2 - P_{мх}$. Если пренебречь механическими потерями ($P_{мх} = 0$), то получим $P = P_2$. Потери магнитные и механические составляют в сумме потери холостого хода и могут быть определены на основании опыта холостого хода, т.е. при вращении двигателя без всякой нагрузки, когда почти вся потребляемая мощность идет на покрытие потерь холостого хода. Потери в обмотке статора определяются путем измерения сопротивления статорной обмотки. Потери в обмотке ротора определяются путем измерения частоты вращения двигателя, а следовательно, скольжения $s$.

Коэффициент полезного действия двигателя определяется по выражению:

$$n = (P_1 - \sum P) / P_1 \quad (4.14)$$

где $\sum P = P_{об1} + P_{об2} + Pс + P_{мх} + P_д$ – сумма всех потерь в двигателе, Вт; $P_д$ – дополнительные потери, Вт. По мере увеличения мощности двигателей их номинальный КПД растет.

### 4.5. Коэффициент мощности cosφ.

Потребление асинхронными двигателями реактивной мощности из сети вызывает отставание по фазе статорного тока от напряжения питания, поэтому его cosφ всегда меньше единицы. Низкий cosφ ухудшает условия работы генераторов, трансформаторов, линий передачи и других частей энергоснабжающих установок. Величина cosφ зависит от свойств и условий работы приемников электрической энергии и может быть определена как отношение полезной мощности двигателя к мощности, потребляемой из сети. Причиной понижения cosφ является недогрузка, т. е. слабое использование асинхронных двигателей, что всецело связано с условиями работы приводимых в движение агрегатов и машин. Повышение степени загрузки оборудования помимо всех других технико-экономических преимуществ дает коренное улучшение и в отношении коэффициента мощности энергетических установок. Номинальный cosφ, соответствующий номинальной нагрузке двигателей, при прочих равных условиях растет с увеличением мощности двигателей. Зависимость cosφ = $f(P)$ определяется тем, что в асинхронном электродвигателе ток статора $I_1$ имеет индуктивную составляющую, необходимую для создания магнитного поля статора, поэтому его cosφ всегда меньше единицы. Наименьшее значение cosφ соответствует режиму холостого хода и обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на вал

электродвигателя коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшей величины (0,8 ...0,9) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением cosφ, что объясняется увеличением индуктивного сопротивления ротора за счет увеличения скольжения. В целях повышения коэффициента мощности асинхронных электродвигателей чрезвычайно важно, чтобы электродвигатель работал всегда или, по крайней мере, значительную часть времени с номинальной нагрузкой. Это можно обеспечить лишь при правильном выборе мощности электродвигателя. Иногда асинхронные двигатели должны длительное время работать со значительно пониженной нагрузкой. Если двигатели работают при полной нагрузке с соединением обмотки статора в треугольник, то в периоды пониженных нагрузок бывает рациональным переключение на соединение в звезду, т. е. уменьшение фазного напряжения $U_1$ и ЭДС $E_1$ в $\sqrt{3}$ раз. Соответственно этому уменьшается магнитный поток, а также намагничивающий реактивный ток.

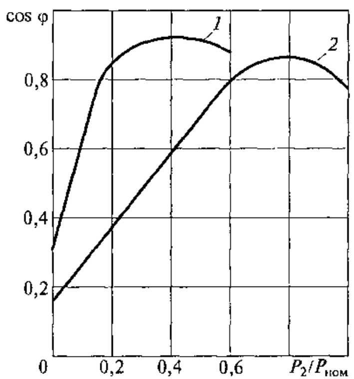



Рис. 4.10. Зависимость коэффициента мощности cosφ от величины полезной нагрузки P.
1 - соединение обмотки в звезду, 2 - соединение обмотки в треугольник.

С другой стороны, при пониженной нагрузке двигателя произведение фазного напряжения на активный ток должно остаться постоянным, что при уменьшении напряжения означает увеличение активного тока. Такое увеличение одновременно с уменьшением реактивной составляющей тока приводит к значительному увеличению cosφ (рис. 4.10). Величина воздушного зазора между ротором и статором существенно влияет на величину реактивной мощности.

### 4.6. Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения $n$, коэффициента полезного действия $\eta$, полезного момента $M$, коэффициента мощности cosφ, величины тока $I_1$ от полезной мощности $P$ при $U_1$ = const и $f$ = const. На рис. 4.11 представлено семейство рабочих характеристик асинхронного двигателя. Рассмотрим некоторые из них. *Скоростная характеристика* $n = f(P)$.

Согласно выражению (4.13):

$$s = P_{об2} / P' \quad (4.15)$$

т.е. скольжение ротора электродвигателя, а следовательно, его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе $P_{об2}$ к электромагнитной мощности $P'$. При холостом ходе потери $P_{об2}$ пренебрежимо малы по сравнению с мощностью $P'$, поэтому здесь $s \approx 0$ и $n_1 \approx n$. По мере увеличения нагрузки согласно выражению (4.13) растет $P_{об2}$, достигая значений 0,01...0,06 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n = f(P)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора угол наклона этой кривой увеличивается, т.е. возрастает изменение частоты вращения ротора $n$ при колебаниях нагрузки $P$. Объясняется это тем, что с увеличением сопротивления ротора электрические потери в роторе $P_{об2}$ возрастают.

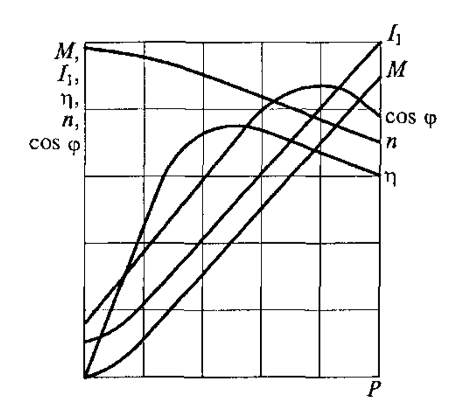



Рис. 4.11. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Нагрузочная характеристика $M = f(P)$. Зависимость полезного момента $M$ на валу электродвигателя от полезной мощности $P$ определяется по выражению:

$$M = P / \omega_2 = 60P / 2\pi n \quad (4.16)$$

Из выражения (4.16) следует, что если частота вращения двигателя остается постоянной, то при изменении нагрузки график $M = f(P)$ имеет вид прямой. Но с увеличением $P$ частота вращения асинхронного двигателя уменьшается, поэтому полезный момент $M$ возрастает быстрее, чем $P$, вследствие чего зависимость $M = f(P)$ имеет нелинейный характер.

### 4.7. Коллекторные машины переменного тока.

Стремление получить электродвигатель, имеющий хорошие регулировочные свойства и работающий от сети переменного тока, обусловило создание коллекторных двигателей переменного тока. Коллекторный двигатель постоянного тока в принципе может работать от сети переменного тока, так как в этом случае изменение направления тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения происходит одновременно. Также одновременно происходит изменение направления тока якоря $I_я$ и магнитного потока возбуждения Ф. В итоге среднее значение электромагнитного момента за период остается положительным. Такие электродвигатели могут быть однофазными или трехфазными. Однофазные коллекторные двигатели переменного тока преимущественно имеют последовательное возбуждение. Ток якоря и магнитный поток возбуждения у них совпадают по фазе, поэтому среднее значение электромагнитного момента в двигателе последовательного возбуждения больше, чем в двигателе параллельного возбуждения. По своей конструкции однофазные коллекторные двигатели переменного тока отличаются от электродвигателей постоянного тока тем, что их станина и главные полюсы делаются шихтованными из листовой электротехнической стали, а обмотки якоря исполняются в «елочку». Такая технология позволяет сократить магнитные потери, которые при работе электродвигателя от сети переменного тока повышаются, поскольку переменный ток в обмотке возбуждения вызывает перемагничивание всей магнитной системы машины, включая станину и сердечники полюсов. Основным недостатком однофазных коллекторных двигателей являются тяжелые условия коммутации, обусловленные тем, что в коммутируемых секциях помимо реактивной ЭДС $e_р$ и ЭДС в обмотке якоря $E_я$ наводится трансформаторная ЭДС $e_т$. Возникновение трансформаторной ЭДС объясняется тем, что переменный ток в обмотке возбуждения создает переменный магнитный поток, который пронизывает коммутируемые секции и индуцирует в них ЭДС. Для уменьшения трансформаторной ЭДС необходимо уменьшить магнитный поток $Ф_{мах}$. Чтобы мощность электродвигателя при этом осталась прежней, увеличивают число полюсов или применяют одновитковые секции, хотя это приводит к росту числа коллекторных пластин. При помощи добавочных полюсов с обмоткой, включенной в цепь якоря, в коммутируемых секциях создают ЭДС $e_к$, частично компенсирующую $e_р$ и $e_т$. Однако полной компенсации указанных ЭДС можно добиться только при определенных значениях тока

якоря и его частоты вращения. При других режимах работы электродвигателя условия коммутации остаются тяжелыми. В момент пуска электродвигателя условия коммутации наиболее тяжелы, так как в этот момент противо ЭДС равна нулю, а ЭДС $e_р$ и $e_т$ достигают наибольших значений. Регулировать частоту и направление вращения ротора однофазного коллекторного двигателя можно теми же способами, что и в двигателях постоянного тока последовательного возбуждения. Однофазные коллекторные электродвигатели малой мощности (до 500 Вт) не имеют ни компенсационной обмотки, ни добавочных полюсов. Эти двигатели могут работать как от сети постоянного, так и от сети переменного тока, поэтому их называют универсальными коллекторными электродвигателями. Рассматриваемые коллекторные электродвигатели широко используются в электроинструментах различного назначения.

Контрольные вопросы

1. Почему увеличенное скольжение ротора вызывает нагрев машины?
2. Как зависит частота вращения асинхронного двигателя от числа пар полюсов?
3. Укажите особенности выполнения обмоток статора, асинхронных электродвигателей.
4. Объясните природу возникновения вращающего момента ротора асинхронного электродвигателя.
5. Что характеризует величина cosφ?
6. В чем заключаются особенности работы коллекторных машин переменного тока?

## Глава 5. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.

### 5.1. Принцип действия синхронных машин.

Синхронные машины чаще всего применяются в качестве генераторов переменного тока на тепловозах и в рефрижераторных секциях. Синхронные двигатели в отличие от двигателей других типов имеют строго постоянную частоту вращения при заданной частоте напряжения питания, не зависящую от нагрузки, и имеют ограниченное применение. Синхронной называется бесколлекторная машина переменного тока, в которой частота вращения ротора $n_1$ находится в строго постоянном соотношении с частотой $f$ сети переменного тока:

$$n_1 = 60f / p \quad (5.1)$$

где $p$ – число пар полюсов. Как вы уже знаете, в обмотке якоря генератора постоянного тока индуцируется переменная ЭДС, которая с помощью коллектора и щеток преобразуется в постоянную ЭДС. Следовательно, если генератор постоянного тока лишить коллектора, то он превратится в генератор переменного тока. На рис. 5.1 изображена конструктивная схема синхронной машины. Вращающаяся часть генератора называется ротором, неподвижная – статором. Щетки наложены на контактные кольца 7, соединенные с выводами обмотки ротора. Если предположить, что магнитная индукция B распределяется в воздушном зазоре синусоидально ($B = B_m \sin \alpha$), то ЭДС, индуцируемая в якорной обмотке генератора, также является синусоидальной:

$$E = Blv = Blv\sin\alpha \quad (5.2)$$

где $l$ длина проводника, м; $v$ – линейная скорость движения проводника, м/с; Вт – максимальное значение индукции в воздушном зазоре, Тл; α – угол поворота ротора, °. Отсутствие необходимости выпрямлять ЭДС с помощью коллектора упрощает конструкцию синхронной машины. Рабочую обмотку 2, в которой индуцируется ЭДС, теперь можно расположить на неподвижной части генератора – на статоре 1, а обмотку возбуждения – на роторе 8. Такая конструктивная схема наиболее рациональна в синхронных машинах, поскольку при расположении рабочей обмотки на роторе пришлось бы передавать из рабочей обмотки через контактные кольца значительные мощности. При расположении рабочей обмотки на статоре ее выводы присоединяются непосредственно к электрической сети или потребителям. На роторе машины устанавливаются контактные кольца и щетки для соединения обмотки возбуждения с возбудителем.

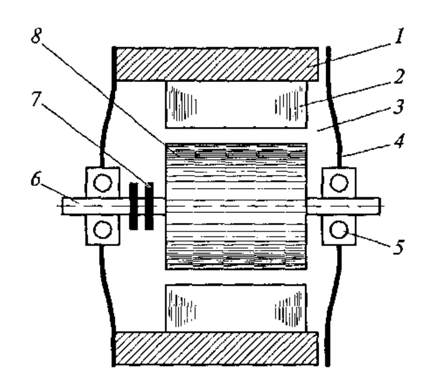



Рис. 5.1. Конструктивная схема синхронной машины.
1 – статор, 2 – обмотка статора, 3 – воздушный зазор, 4 – подшипниковый щит,
5– подшипник, 6– вал, 7– контактное кольцо, 8 – ротор (индуктор)

Но так как ток возбуждения в десятки раз меньше рабочего (переменного) тока, а напряжение незначительно, то щеточный контакт работает более надежно и потери энергии в нем невелики. Исходя из перечисленных соображений синхронные машины, как правило, выполняют с рабочей обмоткой, располагаемой на статоре синхронных генераторов частота вращения ротора и частота ЭДС определяются свойствами первичных двигателей. В силовых установках подвижного состава в качестве первичных двигателей применяют двигатели внутреннего сгорания (дизели). Большинство первичных двигателей работает при сравнительно небольшой частоте вращения (100...1000 об/мин), поэтому для получения переменного тока необходимой, в частности промышленной, частоты в генераторах применяют роторы с большим числом полюсов. На тепловозах с передачей мощности переменно-постоянного и переменного тока в качестве тяговых используют синхронные генераторы, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с генераторами постоянного тока. Их также используют в качестве вспомогательных машин на тепловозах, электровозах и в пассажирских вагонах.

### 5.2. Конструкция синхронных машин.

Статор является неподвижной частью синхронной машины и состоит из корпуса и сердечника, в пазах которого располагается обмотка. Статор синхронной машины практически не отличается от статора асинхронной машины. Корпуса для машин малой мощности отливаются из чугуна или стали, а для машин средней и большой мощности выполняют сварными. Сердечник статора машины набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, которые штампуют в виде колец и до сборки покрывают с обеих сторон изоляционным лаком. Сердечник формируют в осевом направлении из ряда пакетов толщиной до 60 мм, между которыми оставляют воздушный зазор (вентиляционный канал) шириной 5...10 мм. В листах сердечника статора вырубают пазы для укладки проводников обмотки статора. Чаще всего пазы выполняют прямоугольными, открытыми или полузакрытыми (рис. 5.2). В неявнополюсных синхронных машинах ротор набирают из листов электротехнической стали. Для размещения обмотки возбуждения на наружной поверхности ротора вырубают прямоугольные пазы, которые занимают только две трети окружности ротора (рис. 5.3, *а*). Обмотку ротора выполняют из медного провода прямоугольного сечения и закрепляют с помощью закладываемых в пазы клиньев. Изоляция обмотки ротора осуществляется так же, как и обмотки статора. Концы обмотки ротора выводятся на контактные кольца. В явнополюсных синхронных машинах, ротор состоит из обода, на котором закреплены сердечники полюсов с катушками (рис. 5.3, *б*). Сердечник полюса с одной стороны имеет полюсный наконечник, а с другой – хвост, при помощи которого он крепится на ободе. Сердечники полюсов набирают из листов электротехнической стали толщиной 1...2 мм и стягивают шпильками.

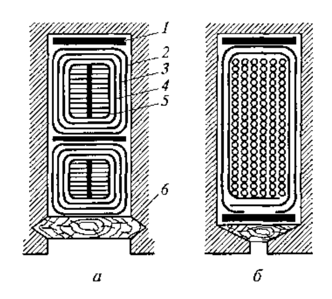



Рис. 5.2. Пазы статора.
*а* – открытый; *б* – полузакрытый;
1 – прокладка из прессшпана; 2 – электрокартон; 3 – микафолий; 4 – миткалевая лента; 5– проводники; 6 – клин

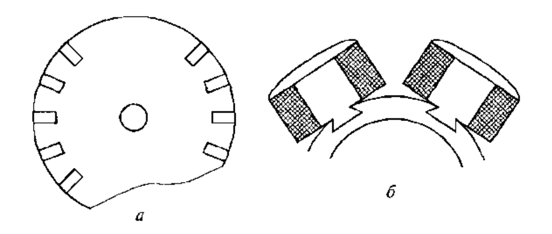



Рис. 5.3. Роторы неявнополюсной (*а*) и явнополюсной (*б*) синхронных машин

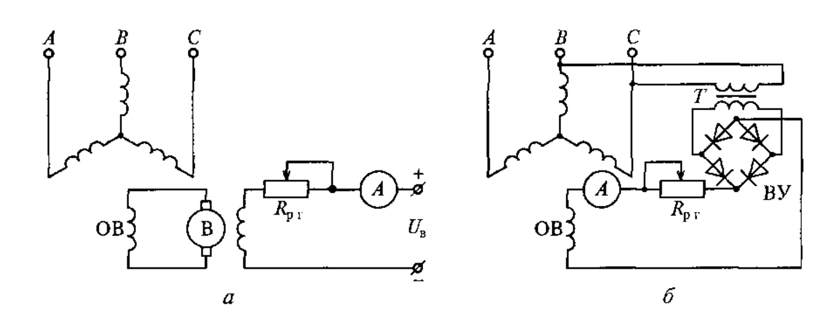



Рис. 5.4. Электрические схемы возбуждения синхронных генераторов.
*а* – независимое возбуждение; *б* – самовозбуждение;
*A*, *B, C*– выводы обмоток фаз; $U_в$ – напряжение обмотки возбудителя; *T* – трансформатор

Для подвода тока к обмотке ротора или подключения к ней реостата на роторе установлены контактные кольца: три кольца при трехфазном токе и два кольца яри постоянном. Токосъем с контактных колец осуществляется с помощью щеток, установленных в щеткодержателях и прижимаемых к контактной поверхности пружинами. В синхронных машинах применяются два способа возбуждения: электромагнитное и возбуждение постоянными магнитами. При электромагнитном возбуждении основной магнитный поток создается обмоткой возбуждения. В зависимости от способа питания обмотки возбуждения ОВ постоянным током синхронные машины подразделяются на машины независимого возбуждения и машины с самовозбуждением. При независимом возбуждении обмотка возбуждения питается от генератора постоянного тока *В*, называемого возбудителем (рис. 5.4, *а*). Реостат $R_{рг}$ предназначен для регулирования величины тока возбуждения. Мощность возбудителя составляет 2...5% мощности синхронной машины. Возбудитель обычно монтируют совместно с синхронной машиной, и он является ее неотъемлемой частью. При самовозбуждении питание обмотки возбуждения осуществляется самим синхронным генератором через выпрямитель ВУ, а регулирование тока обмотки возбуждения выполняется при помощи реостата $R_{рг}$ (рис. 5.4, *б*). Самовозбуждение применяется в машинах малой и средней мощности. При возбуждении постоянными магнитами последние

обычно располагаются на роторе, при этом отпадает необходимость в контактных кольцах. Отсутствие обмотки возбуждения уменьшает электрические потери, а следовательно, повышает коэффициент полезного действия машины.

### 5.3. Обмотки статоров синхронных машин.

Обмотки статоров машин переменного тока имеют много общего с обмотками якоря машин постоянного тока и асинхронных машин. Но между ними есть и существенное различие – обмотки переменного тока являются незамкнутыми. Элементом обмотки статора является секция, которая может быть одно- или многовитковой. Секция состоит из активных сторон и лобовых частей. Расстояние между активными сторонами секции называется шагом обмотки $y$. Шаг называется диаметральным, или полным, если он равен полюсному делению, и укороченным, если он меньше полюсного деления. Применяемые в настоящее время обмотки статора классифицируются по следующим признакам:

- по числу фаз – однофазные и многофазные (главным образом трехфазные);
- по способу укладки секций в пазы – однослойные, когда сторона секции занимает весь паз, и двухслойные, когда в одном пазу лежат две стороны различных секций (по аналогии с обмоткой якоря машины постоянного тока);
- в зависимости от размеров секций – обмотки с полным и обмотки с укороченным шагом.

Простейшая трехфазная обмотка может быть выполнена в виде трех секций, оси которых сдвинуты по окружности статора на 1/3 двойного полюсного деления $2\tau/3$. Каждая секция в этом случае представляет собой фазную обмотку. Обычно фазная обмотка состоит не из одной, а из нескольких секций, занимающих $q$ пазов в пределах каждого полюсного деления. Таким образом, для образования трехфазной обмотки зубцовый слой сердечника статора в пределах каждого полюсного деления необходимо разделить на три зоны по $q$ пазов в каждой. Порядок чередования таких зон под каждым полюсом должен быть одинаковым. Секции, уложенные в пазы одинаковых зон, образуют фазные обмотки. Число пазов $q$ приходящихся на полюс и фазу, определяется по формуле:

$$q = Z / 2pm \quad (5.3)$$

где Z – число элементарных пазов на статоре; $p$ – число пар полюсов; $m$ – число фаз, для трехфазной обмотки $m = 3$. Угол сдвига между осями фазных обмоток в трехфазной обмотке составляет 120 эл. град. (рис. 5.5) Для электрических машин подвижного состава принято обозначать начала фазных обмоток 1С1, 1С2, 1С3, а концы – 2С1, 2С2, 2С3. Однако для построения схемы обмотки удобнее выразить этот сдвиг в пазах. Вся окружность статора составляет $360p$ эл. град., поэтому угол между соседними пазами:

$$\alpha = 360p / Z \quad (5.4)$$

Тогда сдвиг между фазными обмотками, выраженный в пазах, равен:

$$\lambda = 120 / \alpha \quad (5.5)$$

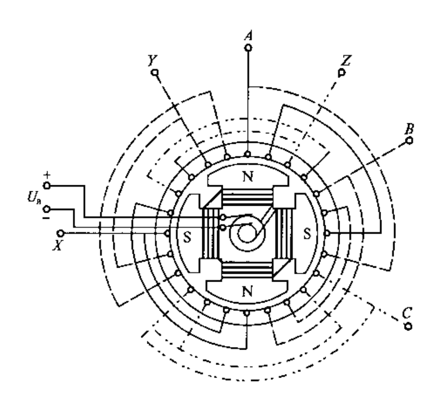



Рис. 5.5. Порядок чередования фазных обмоток.
*A*, *B*, *C* – начала обмоток; *X*, *Y*, *Z* – их концы;
$U_в$ – напряжение на обмотке возбуждения.

**Двухслойные обмотки статора**. Рассмотрим порядок построения развернутой схемы двухслойной обмотки статора. На развернутой поверхности статора размечаем пазы (Z = 18) и полюсные деления ($2p = 6$), а затем наносим верхние (сплошные) и нижние (пунктирные) стороны секций (рис. 5.6). Размечаем зоны с числом пазов $q = 3$ для всех фаз, при этом расстояние между зоной какой-либо фазы в одном полюсном делении и зоной этой же фазы в другом полюсном делении должно быть равно шагу обмотки ($y = 6$).

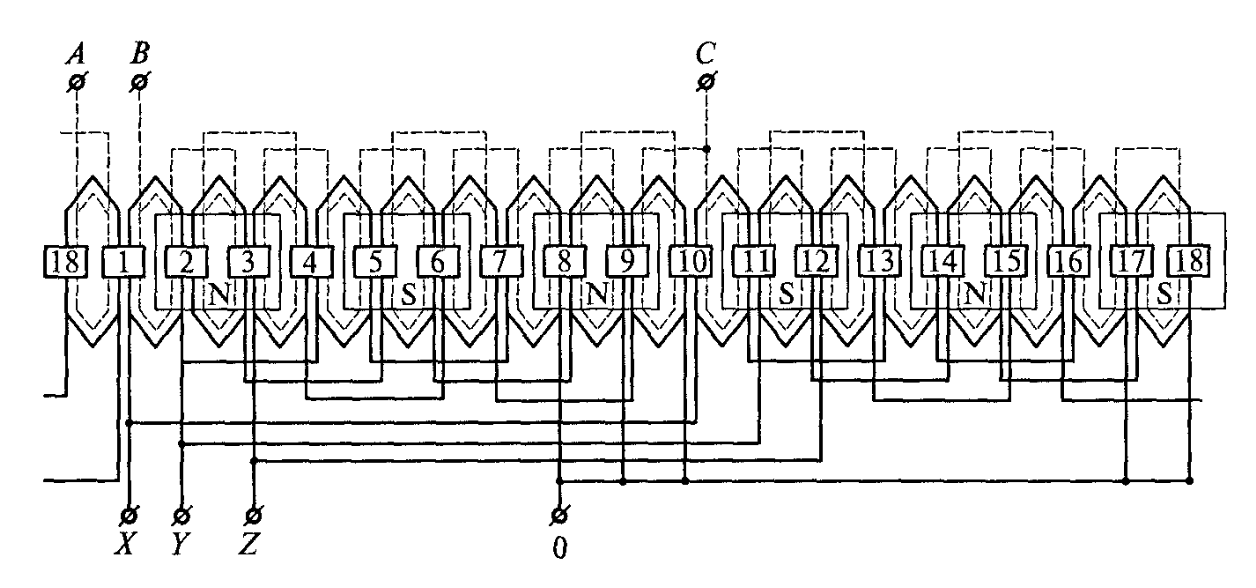



Рис. 5.6. Порядок построения развернутой схемы трехфазной двухслойной обмотки статора.
*A*, *B*, *C* – начала трехфазных обмоток статора;
*X*, *Y*, *Z* – концы трехфазных обмоток

Далее отмечаем расстояние λ между началами фазных обмоток (λ = 2). Двухслойные обмотки имеют преимущественное распространение в машинах переменного тока, что объясняется рядом достоинств двухслойных обмоток. Главным из этих достоинств является возможность любого укорочения шага обмотки, что дает, в свою очередь, возможность максимально приблизить форму кривой ЭДС к синусоиде. Секционной группой называется ряд последовательно соединенных между собой секций, которые лежат в соседних пазах и принадлежат одной фазной обмотке. Каждая секционная группа имеет $q$ последовательно соединенных секций. Количество секционных групп в фазной обмотке равно числу полюсов. Следовательно, в двухслойной обмотке общее количество секционных групп:

$$A = 2pm \quad (5.6)$$

*Секционные группы* каждой фазы статорной обмотки могут соединяться последовательно или параллельно, что влияет на число параллельных ветвей в обмотке. Если половину секционных групп каждой фазной обмотки соединить последовательно в одну ветвь, а затем полученные ветви соединить параллельно, то получим обмотку с двумя параллельными ветвями ($2a = 2$). Для того чтобы ЭДС параллельных ветвей были одинаковы, в каждую параллельную ветвь включают секционные группы через одну. Таким образом, в одной параллельной ветви оказываются все четные секционные группы, а в другой – все нечетные.

**Однослойные обмотки статора.** В однослойных обмотках каждая сторона секции полностью заполняет паз сердечника статора. Однослойные обмотки бывают концентрические и шаблонные. В *концентрической* обмотке секции каждой секционной группы имеют разную ширину и располагаются концентрически. Шаги обмотки у секций, входящих в секционную группу, неодинаковы, но их среднее значение определяется выражением:

$$y_{ср} = Z / 2p \quad (5.7)$$

Поскольку секции, образующие секционные группы, не одинаковы по размеру, то секционные группы концентрических обмоток имеют разные сопротивления. Это следует учитывать при определении размеров секций секционных групп, образующих фазную

обмотку. Необходимо, чтобы все фазные обмотки имели одинаковое сопротивление и, следовательно, содержали одинаковое число различных по размерам секционных групп. Существенным недостатком концентрических обмоток является то, что наличие в них секций разных размеров усложняет изготовление обмотки. От этого недостатка избавлены *шаблонные* однослойные обмотки. Все секции этих обмоток имеют одинаковые размеры и могут изготовляться на общем шаблоне. Кроме того, все секции таких обмоток имеют одинаковые сопротивления, а лобовые части получаются короче, чем в концентрических обмотках, что уменьшает расход меди. Обмотки трех фаз обычно соединяются в звезду, что позволяет при заданном линейном напряжении сети получать меньшее фазное напряжение, определяющее требования к изоляции обмотки. Это имеет большое значение именно для синхронных машин, предназначаемых в большинстве случаев для высокого напряжения.

## 5.4. Электродвижущая сила фазной обмотки статора.

ЭДС фазной обмотки статора $E_1$ представляет собой сумму ЭДС всех секций, составляющих фазную обмотку. Как уже отмечалось, фазная обмотка состоит из секционных групп, каждая из которых состоит, в свою очередь, из $q$ секций, расположенных под одной парой полюсов. Из этого следует, что все группы состоят из одинакового числа секций, находящихся в одинаковых магнитных условиях. Поэтому при последовательном соединении секционных групп в фазной обмотке ее ЭДС равна: $E_1 = E_{гр}2p$ (5.8)
где $E_{гр}$ ЭДС одной секционной группы, В. Если бы все секции секционной группы были сосредоточены в двух пазах, то их ЭДС совпадали по фазе, а ЭДС всей секционной группы была равна арифметической сумме ЭДС секций $E_с$, образующих группу:

$$E_{гр} = E_с q \quad (5.9)$$

Однако практическое применение имеют распределенные обмотки статоров, у которых активные стороны секций каждой секционной группы занимают несколько пазов под каждым полюсом. Поэтому ЭДС, наводимые в секциях секционной группы, оказываются сдвинутыми по фазе относительно друг друга на угол сдвига между соседними пазами а, определяемый по выражению (5.4). В процессе работы вращающееся поле ротора синхронной машины движется относительно активных проводников обмотки статора с линейной скоростью: $v = \pi D n / 60$ (5.10)
где $D$ – диаметр расточки статора, м; $n$ – частота вращения ротора, об/мин. При этом в проводнике обмотки статора наводится ЭДС, имеющая максимальное значение:

$$E_{прmax} = B_m l v = B_m l \times 2\tau f \quad (5.11)$$

где $B_m$ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; $l$ – активная длина проводника, м; $\tau = \pi D/2p$ – полюсное деление, м. Если принять, что магнитная индукция распределена в воздушном зазоре синусоидально, то среднее значение магнитной индукции: $B_{ср} = 0{,}636 B_m$ (5.12)
Заменив в (5.11) максимальное значение индукции средним, получим выражение максимального значения ЭДС проводника:

$$E_{прmax} = (\pi B_{ср} / 2) \times l \times 2f\tau = \pi \Phi f \quad (5.13)$$

где $\Phi = B_{ср} l \tau$ – основной магнитный поток ротора, Вб. Определим действующее значение ЭДС проводника: $E_{пр} = (E_{прmax} / \sqrt{2}) = (\pi / \sqrt{2}) \times \Phi f$ (5.14)
Далее определим действующее значение ЭДС секции обмотки с диаметральным шагом ($y = \tau$) и числом витков $w_с$: $E_с = 2E_{пр} w_с = (2\pi / \sqrt{2}) \times \Phi f w_с$ (5.15)
или $E_с = 4{,}44 \Phi f w_с$ (5.16)
где $w$с – число витков секции. Если секция выполнена с укороченным шагом, то в формулу (5.16) следует ввести коэффициент укорочения шага $K_{у1}$ учитывающий уменьшение ЭДС первой гармоники при укорочении шага секции:

$$E_с = 4{,}44\ \Phi f w_с K_{у1} \quad (5.17)$$

Для определения ЭДС одной фазы обмотки (см. формулу (5.17)) необходимо ЭДС одной секции $E_с$ умножить на число последовательно соединенных секций. При последовательном

соединении секционных групп число последовательно соединенных секций в фазной обмотке равно $2pq$. Следовательно, ЭДС фазной обмотки:

$$E_c = 4{,}44\ \Phi f w_1 K_1 \quad (5.18)$$

где $w_1$ – число витков одной фазы статора; $K_1$ – обмоточный коэффициент.

## 5.5. Реакция якоря синхронной машины.

Магнитный поток в синхронных машинах создается совместным действием магнитодвижущих сил системы возбуждения и статора. Если синхронный генератор работает вхолостую, т.е. при разомкнутой обмотке статора, то общий магнитный поток в машине $\Phi = \Phi_в$, где $\Phi_в$ – поток, создаваемый МДС системы возбуждения. При нагрузке генератора на общий магнитный поток оказывает влияние магнитный поток, создаваемый током в обмотке статора. Взаимодействие этих полей носит название реакции якоря. В отличие от синхронных в асинхронных машинах благодаря трансформаторной связи между обмотками статора и ротора размагничивающее действие ротора («реакция якоря») автоматически компенсируется увеличением МДС статора. За счет этого результирующий магнитный поток асинхронной машины при изменении нагрузки остается примерно постоянным. В синхронном генераторе реакция якоря зависит не только от величины нагрузки или тока в статоре, но и от рода нагрузки, т.е. от угла сдвига фаз между напряжением и током, и эта зависимость более сильная. При обычной индуктивной нагрузке ток отстает по фазе от ЭДС и достигает своего максимума в проводнике статора уже после того, как середина полюса прошла мимо этого проводника (рис. 5.7), т.е. когда ротор уже прошел положение, соответствующее максимуму ЭДС. Угол φ равен углу сдвига фаз между ЭДС и током в статоре. Конфигурация потока реакции якоря зависит от распределения тока в проводниках статорной обмотки. Теперь ось потока реакции якоря не перпендикулярна оси потока возбуждения, а образует с ней угол α = 90° + φ, который остается неизменным при вращении ротора. Реакция якоря оказывает влияние на рабочие характеристики синхронной машины, так как изменение магнитного поля в машине сопровождается изменением ЭДС, наведенной в обмотке статора, а следовательно, и изменением ряда других величин, связанных с этой ЭДС.

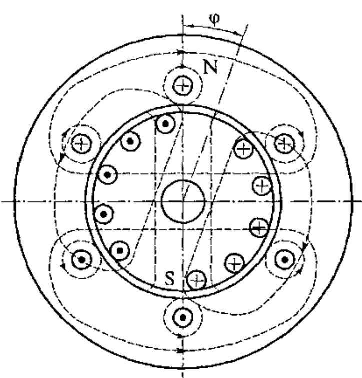



Рис. 5.7. Магнитное поле реакции якоря.
(положение ротора соответствует максимуму тока в фазе 1)

В принципе, реакция якоря синхронных машин аналогична реакции якоря в машинах постоянного тока. Однако если в машинах постоянного тока влияние реакции якоря на рабочие свойства машины зависит исключительно от величины нагрузки, то в синхронных машинах это влияние определяется еще и характером нагрузки. Синхронные генераторы, как правило, работают на смешанную нагрузку (активно-индуктивную или активно-емкостную). Но для выяснения вопроса о влиянии реакции якоря на работу синхронной машины целесообразно рассмотреть случаи работы генератора при нагрузках предельного характера, т. е. чисто активной, чисто индуктивной и чисто емкостной.

**Активная нагрузка (φ = 0).** На рис. 5.7 представлены статор и ротор двухполюсного генератора. На статоре показана часть фазной обмотки. Ротор вращается против часовой стрелки. В рассматриваемый момент времени ротор занимает вертикальное положение, что соответствует максимуму ЭДС $E_{max}$ в фазной обмотке. Поскольку ток при активной нагрузке совпадает по фазе с ЭДС, то указанное положение ротора соответствует также и максимуму тока. Построив линии магнитной индукции поля возбуждения (ротора) и линии магнитной индукции поля обмотки статора, видим, что МДС обмотки статора направлена перпендикулярно МДС возбуждения. Такое взаимодействие магнитных потоков $Ф_в$ и $Ф_{ря}$ аналогично реакции якоря в генераторе постоянного тока при расположении щеток на геометрической нейтрали: магнитное поле машины ослабляется под набегающим краем полюса и усиливается под сбегающим краем. Вследствие насыщения магнитной цепи результирующее магнитное поле машины несколько ослабляется.
**Индуктивная нагрузка (φ = 90°).** При чисто индуктивной нагрузке генератора ток статора $I_1$ отстает по фазе от ЭДС $E_{max}$ на 90°. Поэтому он достигает своего максимального значения лишь после поворота ротора вперед на 90° относительно его положения, соответствующего максимуму ЭДС. При этом поток реакции якоря $Ф_{ря}$ действует по оси полюсов ротора встречно потоку возбуждения $Ф_в$. Следовательно, реакция якоря в синхронном генераторе при чисто индуктивной нагрузке оказывает продольно-размагничивающее действие.
**Емкостная нагрузка (φ= - 90°).** Так как ток $I_1$ при емкостной нагрузке опережает по фазе ЭДС $E_{max}$ на 90°, то своего наибольшего значения он достигает раньше, чем ЭДС. Поток реакции якоря $Ф_{ря}$ так же, как и в предыдущем случае, действует по оси полюсов, но теперь уже согласно с потоком возбуждения $Ф_в$, в результате чего происходит усиление магнитного поля возбуждения. Таким образом, при чисто емкостной нагрузке синхронного генератора реакция якоря оказывает продольно-намагничивающее действие.
**Смешанная нагрузка.** При смешанной нагрузке синхронного генератора ток статора $I_1$ сдвинут по фазе относительно ЭДС $E_{max}$ на угол φ, значения которого находятся в пределах $0 < φ < ±90°$. В явнополюсной машине магнитное сопротивление в межполюсном пространстве больше магнитного сопротивления под полюсами, что объясняется значительным воздушным зазором в межполюсном пространстве. Поэтому составляющая магнитного потока ротора по поперечной оси в явнополюсной машине намного меньше, чем в неявнополюсной. При определении поперечной составляющей МДС ротора для явнополюсной машины это уменьшение потока учитывается коэффициентом $K_q$ поперечной реакции якоря.

### 5.6. Характеристики синхронного генератора.

Свойства синхронного генератора определяются характеристиками холостого хода, короткого замыкания и внешними. *Характеристика холостого хода* синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения $U_{xx}$ в режиме холостого хода генератора от тока возбуждения $I_в$ при неизменной скорости вращения ротора: $U_{xx} = f(I_в)$ при $I_x = 0$ и $n$ = const (рис. 5.8). Обычно снимают восходящую и нисходящую ветви характеристики, которые вследствие гистерезисных свойств магнитной цепи не совпадают. *Характеристику короткого замыкания* $I_{1кз} = f(I_в)$ можно получить проведением опыта короткого замыкания: выводы статорной обмотки замыкают накоротко и приводят ротор машины во вращение с номинальной частотой. Затем возбуждают машину, постепенно увеличивая ток обмотки возбуждения от нуля до значения $I_{вкз}$, при котором ток короткого замыкания превышает номинальный рабочий ток статорной обмотки не более чем на 25% ($I_{1кз} = 1{,}25 I_{ном}$).

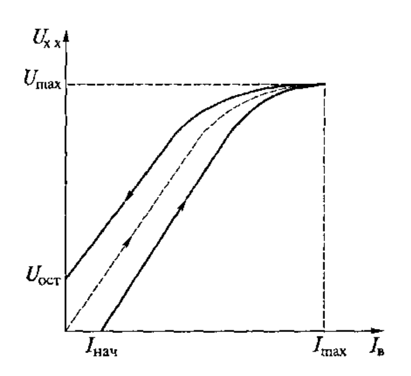



Рис. 5.8. Характеристика холостого хода синхронного генератора:
$U_{max}$-максимальное напряжение генератора; $U_{ост}$ – остаточное напряжение генератора;
$I_{нач}$ – начальный ток возбуждения генератора; $I_{max}$ – максимальный ток возбужденияяния.

В таком режиме ЭДС обмотки статора в несколько раз меньше ЭДС в рабочем режиме генератора. Поэтому основной магнитный поток весьма мал, магнитная цепь машины ненасыщенна и характеристика короткого замыкания представляет собой прямую линию (рис. 5.9). Поскольку активное сопротивление обмотки статора $r_1$ невелико по сравнению с ее индуктивным сопротивлением, то, пренебрегая величиной $r_1$ можно считать, что при опыте короткого замыкания нагрузка синхронного генератора (его собственные обмотки) является чисто индуктивной. Из этого следует, что при опыте короткого замыкания реакция якоря синхронного генератора имеет продольно-размагничивающий характер. Характеристики холостого хода и короткого замыкания дают возможность определить значения токов возбуждения, соответствующие указанным составляющим МДС возбуждения. Внешняя характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на выводах статорной обмотки от величины тока нагрузки: $U_1 = f(I_1)$ при $I_в$ = const; cosφ = const; $n_1 = n_{ном}$ = const. На рис. 5.10 представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам синхронного генератора. При снятии внешней характеристики генератора ток нагрузки изменяют от нуля до номинального значения ($I_1 = I_{1ном}$) при номинальном напряжении на выводах статорной обмотки ($U = U_{1ном}$). Затем постепенно разгружают генератор. При активной нагрузке уменьшение нагрузочного тока сопровождается ростом напряжения, что объясняется уменьшением падения напряжения в статорной обмотке и ослаблением потока поперечной реакции якоря в насыщенной машине.

При индуктивной нагрузке увеличение напряжения при сбросе нагрузки будет более интенсивным, так как с уменьшением тока $I_1$ ослабляется размагничивающее действие реакции якоря. Как следует из предыдущего, кривая идет тем ниже, чем больше ток отстает по фазе от напряжения. При емкостной нагрузке, т.е. при опережающем токе, вследствие появления продольного поля реакции якоря, действующего согласно с основным полем, напряжение при увеличении нагрузки возрастает.

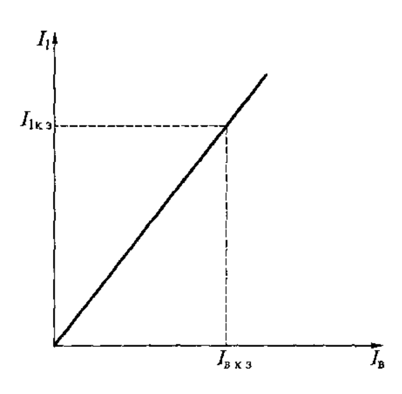



Рис. 5.9. Характеристика короткого замыкания синхронного генератора

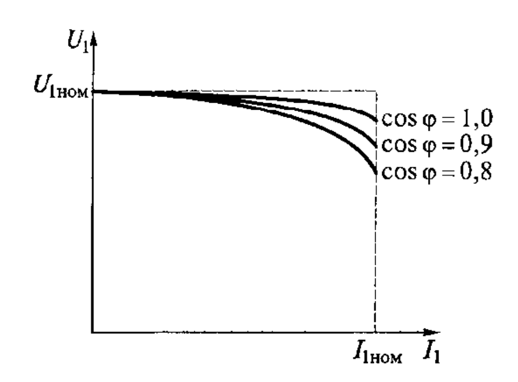



Рис. 5.10. Внешняя характеристика синхронного генератора

## 5.7. Потери и КПД синхронных машин.

Преобразование энергии в синхронной машине сопровождается ее потерями, которые классифицируются следующим образом:

1. Механические потери $P_{мх}$

• потери на трение в подшипниках;

• трение о воздух или другой газ, охлаждающий машину, например водород (вентиляционные потери);

• трение щеток о контактные кольца.

2. Магнитные, или стальные, потери в сердечнике статора $P_с$ слагаются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Эти потери возникают в сердечнике статора под действием вращающегося магнитного поля ротора. Поскольку это поле вращается синхронно с сердечником ротора, то в роторе магнитных потерь почти нет.

3. Электрические потери, обусловленные нагревом статорной обмотки:

$$P_э = m_1 I^2{}_1 r_{75} \quad (5.9)$$

где $m_1$ – число фаз; $I_1$ – фазный ток статорной обмотки, А; $r_{75}$ – активное сопротивление фазы статорной обмотки при рабочей температуре 75°С, Ом.

4. Потери на возбуждение $P_в$, к которым помимо потерь в обмотке возбуждения $I_в U_в$ относятся потери в самом возбудителе, если он работает от общего с синхронной машиной первичного двигателя. Потери в цепи обмотки возбуждения (ротора):

$$P_{ов} = I^2{}_в r_в = I_в U_в \quad (5.20)$$

где $r_в$ – сопротивление цепи возбуждения, включая регулировочный реостат, Ом; $U_в$ – напряжение возбудителя, В. Учет потерь в возбудителе можно оценить, введя КПД возбудителя $\eta_в$, через выражение: $P_в = I_в U_в / \eta_в$

5. Добавочные потери $P_д$, которые слагаются:

• из потерь в поверхностном слое ротора, вызванных пульсациями поля вследствие зубчатости внутренней поверхности статора;

• потерь, вызванных полями рассеяния статора.

Кроме того, для мощных синхронных машин имеют значение некоторые добавочные потери, возникающие главным образом от вихревых токов в проводниках статора, имеющих большое сечение. Путем деления стержней статора на отдельные параллельно включенные проводники и применения других мер удается уменьшить эти потери, но они все-таки остаются соизмеримыми с обычными потерями в обмотке статора. Коэффициент полезного действия синхронного генератора: $\eta = P_э / P_{мх}$ (5.21)

а синхронного двигателя: $\eta = P_{мх} / P_э$ (5.22)

Контрольные вопросы

1. На какой ток рассчитывается каждая фаза синхронного генератора?

2. Каким током возбуждается ротор синхронного генератора?

3. Какие достоинства имеют синхронные генераторы по сравнению с генераторами постоянного тока?

## Глава 6.
## НАГРЕВАНИЕ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.
### 6.1. Нагревание электрических машин.

**Общие сведения.** Работа электрической машины всегда сопровождается ее нагреванием вследствие потерь энергии, происходящих в любой электрической машине. Все виды потерь энергии в итоге преобразуются в теплоту, которая частично отдается в окружающую среду, а частично идет на нагревание машины. Для выяснения закона нагревания электрических машин условно считают, что нагревание происходит равномерно по всему объему машины, а теплота одинаково рассеивается со всей ее поверхности. Нагрузочная способность электрических машин в большинстве случаев определяется условиями нагревания, так как повышение температуры является главной причиной, ограничивающей мощность машины при длительных и кратковременных нагрузках. С увеличением нагрузки возрастают потери энергии в машине и повышается количество выделяющейся теплоты. При чрезмерной нагрузке температура отдельных ее частей, и в первую очередь изоляции, может превысить допустимые пределы. В начальный период работы электрическая машина имеет температуру, практически не отличающуюся от температуры окружающей среды (воздуха). В этом случае вся теплота, выделяемая в машине, идет на повышение температуры ее частей. Затем количество теплоты, рассеиваемой в окружающую среду, увеличивается. И, наконец, через некоторое время машина нагреется настолько, что вся теплота, выделяющаяся в машине в единицу времени, будет рассеиваться в окружающую среду. В этом случае дальнейшее повышение температуры машины прекратится, и наступит режим теплового равновесия, при котором вся теплота, выделяемая в машине, рассеивается с ее поверхности в окружающую среду. Процессы нагревания и охлаждения во всех типах электрических машин происходят по общим законам, так как любую электрическую машину можно в первом приближении рассматривать как некоторое идеальное однородное твердое тело. В действительности электрическая машина не является таким телом, а представляет собой совокупность ряда частей (обмоток, элементов магнитопроводом, конструктивных деталей), которые имеют различную теплопроводность, теплоемкость и условия охлаждения, вследствие чего температура их также различна. Тем не менее, несмотря на сложный характер распределения тепловых полей в электрической машине и недостаточную точность тепловых расчетов, основанных на указанном предположении, можно установить некоторые общие закономерности изменения температуры машины в процессах нагревания и охлаждения.

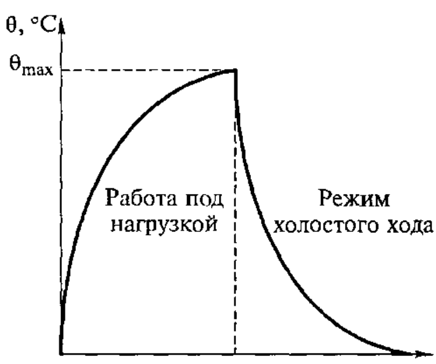



Рис. 6.1. Изменение температуры электрической машины при работе под нагрузкой и в режиме холостого хода.
$\theta_{max}$ – максимальная температура обмотки по классу изоляции.

Потери энергии $\sum P$ возникающие в электрической машине (см. соответствующие подразделы), выделяются в виде теплоты Q, повышающей температуру обмотки и магнитопровода. За промежуток времени $t$ в электрической машине выделяется тепловая

энергия Q = 86l∑*Pt*. Температура электрической машины при ее нагревании и охлаждении изменяется по экспоненциальному закону. При нагревании превышение ее температуры над температурой окружающей среды возрастает (рис. 6.1), асимптотически приближаясь к установившемуся значению, соответствующему определенным значениям тока. Это может происходить при возрастании потерь мощности (т.е. нагрузки) машины или уменьшении интенсивности ее охлаждения. При увеличении интенсивности охлаждения или уменьшении тока нагрузки превышение температуры уменьшается до нового установившегося значения, соответствующего другим значениям тока. Если машина отключается от сети, то ток нагрузки $I_н$ = 0 и машина охлаждается до температуры окружающей среды.

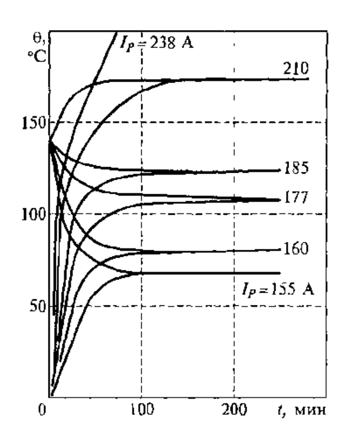



Рис. 6 2. Кривые нагревания и охлаждения ротора тягового генератора ГС-501А при разных токах нагрузки.

Из рассмотрения кривой нагревания электрических машин (рис. 6.2) следует, что при достаточно большой продолжительности работы, превышение температуры ɵ достигает приблизительно постоянного значения. В этом случае наступает практически установившийся тепловой режим, называемый продолжительным (или длительным). Допустимые превышения температуры. В процессе работы электрической машины происходят необратимые изменения изоляции, которые называют старением изоляции. При этом, прежде всего изменяются механические свойства изоляции: снижается механическая прочность, изоляция становится хрупкой, образуются трещины. Наличие трещин в изоляции снижает ее электрическую прочность. Электрические машины обычно рассчитывают на срок службы 15 – 20 лет. Для того чтобы обеспечить заданный срок службы, необходимо при эксплуатации избегать режимов работы, вызывающих преждевременный выход из строя различных частей машины, в первую очередь преждевременное старение изоляции.
Вот главные причины старения изоляции:
• высокая температура;
• большие перепады температуры между отдельными деталями машины;
• электрическое поле;
• повышенная влажность;
• механические нагрузки.
Высокая температура вызывает окисление составляющих изоляцию лаков. Поэтому для обеспечения заданного срока службы электрической машины температура нагревания отдельных ее частей не должна превышать допустимую. Следовательно, максимальная температура, при которой может работать электрическая машина, определяется нагревостойкостью применяемой в ней изоляции. Чем выше допустимая предельная температура отдельных частей машины, тем меньше срок ее службы из-за постепенного старения изоляции. Однако чем выше эта температура, тем больше можно нагрузить данную машину. Электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, в зависимости от нагревостойкости разделяются на семь классов, температурные характеристики которых приведены ниже:

| Класс изоляции | Y | A | E | B | F | H | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Допустимая температура перегрева,°С | 80 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | Выше 180 |

Наиболее чувствительны к высоким температурам материалы, выполненные из целлюлозы, бумаги, шелка и т.п., применяемые в изоляции классов А и Е. В изоляции класса В в первую очередь окисляются связующие материалы и пропитывающие лаки. Изоляция классов F и H, как и изоляция класса В, выполняется на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но содержит связующие вещества с более высокой нагревостойкостью. Изоляция класса С (керамика и слюда) не реагирует на высокие температуры. Экспериментальные исследования показали, что время старения изоляции (годы) под действием температуры можно приближенно определить по формуле: $t = e^{-a\theta}$ (6.1)
где α – коэффициент, зависящий от класса изоляции; θ – температура,°С. Из формулы (6.1) следует, что с увеличением температуры резко возрастает интенсивность старения изоляции. Так, например, для изоляции класса А при температуре 95°С срок службы изоляции составляет 16 лет, при 110°С срок службы всего 4 года, а при 150°С он сокращается до нескольких дней. При ориентировочных расчетах принимают, что повышение температуры изоляции на 8°С сверх допустимой снижает срок службы изоляции класса А в 2 раза (правило восьми градусов). Зависимость срока службы от температуры для изоляции класса В имеет такой же характер, как и для изоляции класса А, но сдвинута на 20°С. Следовательно, и для других видов изоляции справедливы общие соображения, сделанные относительно изоляции класса А, в частности справедливо правило восьми градусов. Практически определить перегрев изоляции трудно, но помнить о его влиянии на срок службы машины всегда полезно. В табл. 6.1 приведены предельно допустимые превышения температуры для некоторых частей электрических машин подвижного состава (температура обмоток измерялась по методу сопротивления, а температура сердечников, коллекторов и контактных колец – с помощью термометров). Максимально допустимую температуру обмотки можно найти путем сложения максимально допустимого превышения температуры с условной температурой окружающей среды, которую принимают равной 40°С.

*Таблица 6.1. Перегрев частей электрической машины*

| Части машины | Максимально допустимая температура,°С | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Классы изоляции | | | | |
| | A | E | B | F | H |
| Обмотки якоря, соединенные с коллектором, и обмотки переменного тока | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 |
| Многослойные обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 |
| Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями | 65 | 80 | 90 | 110 | 135 |
| Сердечники и другие стальные элементы, соприкасающиеся с изолированными обмотками | 60 | 75 | 80 | 110 | 125 |
| Коллекторы и контактные кольца | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |

Если температура окружающей среды превышает условную, то допустимое превышение температуры обмотки в эксплуатации должно быть снижено, чтобы фактическая температура обмотки не превышала допустимой. Если температура окружающей среды меньше условной, то в эксплуатации допускается соответственно увеличивать максимально допустимое превышение температуры обмотки, но не более чем на 10°С по сравнению со значением, установленным стандартами или техническими условиями. При работе машины в

местностях, где из-за понижения барометрического давления ухудшается теплоотдача, предусматривают некоторое уменьшение допустимых превышений температуры. Приведенные в табл. 6.1 значения являются среднестатистическими для электрических машин со сроком службы 8 – 15 лет. В ряде случаев для машин специального назначения сокращают срок службы машины и допускают более высокие значения перегрева изоляции. При этом появляется возможность увеличить мощность при тех же габаритах или выполнить машину заданной мощности с меньшими массой и размерами. Определение среднего превышения температуры обмотки над температурой охлаждающей среды обычно производится по относительному возрастанию сопротивления обмотки или проводника:
$r_2 = r_1[1 + \alpha\ (\theta - \theta_0)]$ (6.2), где $r_1$ и $r_2$ – активное сопротивление обмотки в холодном и нагретом состоянии соответственно, Ом; α – температурный коэффициент (для меди $\alpha = 0{,}004\ K^{-1}$); θ – температура обмотки, °С; $\theta_0$ – температура окружающей среды, °С. Для непрерывного автоматического контроля теплового состояния в наиболее нагретых точках машины во время работы применяются заложенные или встроенные температурные индукторы – термометры сопротивления и термопары.

## 6.2. Режимы работы электрических машин.

В зависимости от характера изменения нагрузки электрические машины могут работать в различных номинальных режимах: продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном и перемежающемся.

**Продолжительный режим.** Продолжительным считается такой режим работы машины, при котором она работает с неизменной нагрузкой и время работы настолько велико, что превышение фактической температуры над температурой окружающей среды достигает установившегося значения. Отсюда следует, что при заданных размерах охлаждающей поверхности и интенсивности охлаждения электрическая машина может быть нагружена только до определенной мощности, при которой ее потери $\sum P$ не превышают значения, соответствующего максимально допустимому превышению температуры. Допустимая величина перегрева определяется нагревостойкостью изоляции обмоток, применяемой в данной машине. Мощность $P$, при которой достигается установившееся значение предельной температуры перегрева, называют *номинальной* мощностью, или мощностью продолжительного режима. Она является основным параметром, характеризующим нагрузочную способность электрической машины при продолжительном режиме работы. Обычно при работе с мощностью $P$ превышение температуры отдельных частей достигает установившегося значения через 3...6 ч для машин средней и большой мощности и через 10...30 мин для микромашин, после чего вся выделяющаяся теплота отдается окружающей среде. Существует понятие *часовой мощности и часового тока*, при работе с которыми холодная машина нагреется до допустимой температуры за один час. Для того чтобы превышение температуры электрической машины при определенной нагрузке не превышало максимально допустимого значения, машина должна иметь достаточные размеры охлаждающей поверхности. При заданной величине поверхности допустимую величину перегрева можно обеспечить, повышая интенсивность охлаждения.

**Кратковременный режим**. При кратковременном режиме работа электрической машины с постоянной нагрузкой чередуется с ее отключениями. При этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышение температуры машины могло достигнуть установившегося значения, а периоды отключения (паузы) достаточно велики, чтобы она успела охладиться до температуры окружающей среды. Для машин общего применения стандарты устанавливают следующую продолжительность рабочего периода: 10, 30, 60 и 90 мин. Продолжительная работа машины с перегрузкой недопустима, и время ее работы должно быть ограничено. Чем больше отдаваемая мощность и, как следствие, больше потери, тем больше величина перегрева и тем интенсивнее нарастает температура в процессе нагревания. Таким образом, чем больше нагрузка машины, тем меньшее время она может

работать до момента достижения предельной величины перегрева. Меньшее время работы машины соответствует большей мощности, которую она может развивать. Допустимую продолжительность кратковременного режима, при которой превышение температуры не возрастает свыше допустимой величины, можно определить по кривым нагревания и охлаждения машины. Следовательно, при кратковременном режиме можно допустить значения тока нагрузки, в несколько раз большие, чем при длительном режиме работы. Во столько же раз могут быть увеличены и допустимые значения потерь мощности. При кратковременных перегрузках длительностью 2...3 мин можно считать, что нагревание происходит без отдачи теплоты (адиабатически).

**Повторно-кратковременный режим.** На подвижном составе электрические машины часто работают в повторно-кратковременном режиме. В этом режиме периоды работы машины под нагрузкой периодически чередуются с периодами отключения машины (паузами), вследствие чего общее время работы машины разбивается на периодически повторяющиеся циклы. При этом за периоды нагрузки превышение температуры не достигает установившегося значения, а за периоды отключения машина не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Время цикла при работе машины в этом режиме не должно превышать 10 мин. Повторно – кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения (ПВ), выраженной в процентах от общего времени включения. При повторно-кратковременном режиме работы кривая нагревания приобретает пилообразный характер, так как периоды нагревания чередуются с периодами охлаждения. Во время рабочего периода величина перегрева возрастает в соответствии с кривой нагревания машины, во время паузы она уменьшается в соответствии с кривой охлаждения. В установившемся режиме работы превышение температуры составляет от $\theta_{max}$ до $\theta_{min}$, причем величина $\theta_{max}$ меньше превышения температуры, которую имела бы машина при непрерывной работе с той же нагрузкой. Так как постоянная времени нагревания в 5 –10 раз превышает рабочий 10-минутный цикл, то разница между $\theta_{max}$ и $\theta_{min}$ будет небольшой и практически устанавливается превышение температуры, определяемое средними потерями за цикл. Это позволяет в рабочий период $t_р$ увеличить реализуемую мощность по сравнению с мощностью в продолжительном режиме. Следовательно, при повторно-кратковременном режиме можно допустить большие нагрузки, чем при длительной непрерывной работе. Отношение потерь мощности в машине, работающей при повторно-кратковременном и продолжительном режимах, при которых достигаются одинаковые установившиеся превышения температуры, соответствует значениям ПВ. На практике при определении мощности, которую может развивать электрическая машина при повторно-кратковременном режиме, часто исходят из эквивалентного тока: если машина рассчитана на работу при повторно-кратковременном режиме $ПВ_1$ то при работе ее в режиме $ПВ_2$ величина тока, которая определяет развиваемую мощность $P_{пв}$, может быть увеличена или уменьшена пропорционально ПВ, например:

| ПВ,% | $P_{пв}$ | ПВ,% | $P_{пв}$ |
|---|---|---|---|
| 60 | 1,3 | 25 | 2,0 |
| 40 | 1,6 | 15 | 2,6 |

**Перемежающийся режим**. В этом режиме кратковременные периоды работы под нагрузкой (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода (паузами). Перемежающийся режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки (ПН), выраженной в процентах. Стандартные значения ПН составляют 15, 25, 40 и 60%. Продолжительность цикла принимают равной 10 мин. Характер изменения при этом режиме аналогичен характеру изменения тех же параметров при повторно-кратковременном режиме. За время работы под нагрузкой температура машины и превышения температуры не достигают установившихся значений.

**Дополнительные номинальные режимы**. Кроме основных номинальных режимов работы в качестве дополнительных (рекомендуемых) устанавливают режимы работы, при которых

нагрузка имеет циклический характер:
1) повторно-кратковременный с частыми пусками при ПВ, равном 15, 25, 40 и 60%;
2) повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением при ПВ, равном 15, 25, 40 и 60%;
3) перемежающийся с частыми реверсами и электрическим торможением;
4) перемежающийся с двумя частотами вращения.
В дополнительных номинальных режимах устанавливается:
• для режимов 1) и 2) – стандартное число включений в час;
• для режима 3) – число реверсов в час;
• для режима 4) – число циклов в час, равное 30, 60, 120 и 240.
**Работа при переменной нагрузке**. В эксплуатации электрических машин возможны режимы, не соответствующие перечисленным. Наиболее типичен режим с быстро изменяющейся нагрузкой, аналогичный повторно-кратковременному, когда в течение цикла температура частей машины существенно не изменяется. Если электрическая машина работает в продолжительном режиме, но при переменной нагрузке, то в различные промежутки времени в ней возникают различные потери мощности. Чтобы определить, может ли машина выполнить заданный график нагрузки, обычно применяют метод эквивалентного тока. В основу его положено предположение о том, что переменные потери в машине пропорциональны квадрату тока нагрузки.
**Работа при переменной токовой нагрузке.** В эксплуатации тяговых электрических машин также возможны режимы работы, не соответствующие указанным. Для этих машин типичен режим с быстроменяющимся током и мощностью. Если они работают в продолжительном режиме с постоянной мощностью, но с разными по величине токами, то тепловой процесс в них следует отнести к не установившемуся, так как при разных токах изменяется и величина потерь.

## 6.3. Вентиляция тяговых электрических машин.

Компактность конструкции тяговых электрических машин подвижного состава создает серьезные трудности при решении вопроса об удалении тепловой энергии, возникающей в них при работе. Интенсивность охлаждения тяговых электрических машин и способ, каким оно осуществляется, являются основными факторами, влияющими не только на конструкцию деталей тягового двигателя, но и на расход в них активных материалов. Как правило, почти все тяговые электрические машины подвижного состава в настоящее время охлаждаются посредством продувания через них воздуха, т. е. вентилируются. Влияние вентиляции на длительную мощность, развиваемую двигателем, весьма значительно. Так, например, длительная мощность совершенно закрытого двигателя трамвайного типа составляет 25...35% его часовой мощности, однако применение вентиляции позволяет повысить ее вдвое и даже более. Правда, на часовой мощности применение вентиляции сказывается незначительно. Так, у двигателей небольших мощностей с частотой вращения до 600 об/мин после конструктивных переделок, требуемых для осуществления вентиляции (например, устройство вентиляционных каналов в сердечнике якоря), часовая мощность двигателя даже несколько понижается по сравнению с мощностью закрытого двигателя. Особенно существенно влияние вентиляции при длительных периодах работы двигателя. Нормальной работой тяговых электрических машин является работа на прерывистую нагрузку. Характер такой нагрузки заключается в следующем: сначала двигатель работает под большим током и при постепенно повышающейся частоте вращения – это пусковой период; затем ток довольно заметно уменьшается, а частота вращения все еще продолжает расти; и, наконец, двигатель вращается без потребления тока – период выбега; в конце перегона двигатель останавливается. Следовательно, на каждом перегоне в тяговом режиме двигатель будет сильно нагреваться. В период выбега накопленная двигателем теплота рассеивается – уносится воздухом. Чем больше двигатель успеет охладиться за период выбега и следующее за ним время покоя, тем в большей мере он будет готов к повторению

подобного теплового цикла на следующем перегоне. Значит, нужно стремиться наиболее целесообразно использовать для охлаждения двигателя то время, когда возникающие в нем потери невелики, и время, когда двигатель не вращается. Существует два основных типа тяговых двигателей в зависимости от способа их вентиляции: закрытые двигатели с *самовентиляцией* и закрытые двигатели с *независимой* вентиляцией. В двигателях с самовентиляцией воздух прогоняется через двигатель вентилятором, расположенным на валу внутри двигателя. Самовентилирующиеся двигатели применяются преимущественно на городском электрическом транспорте (трамваи, троллейбусы и т.п.) или в мотор-вагонах метро и пригородных железных дорог. В двигателях с независимой вентиляцией воздух прогоняется внешним вентилятором с отдельным, независимым от тягового двигателя приводом. Двигатели с независимыми вентиляторами применяются главным образом на магистральных локомотивах. В зависимости от положения вентилятора (как встроенного, так и независимого по отношению к двигателю) различают вентиляцию вытяжную, нагнетательную и смешанную. При независимой вентиляции тяговых электрических машин применяются исключительно нагнетательные вентиляторы. Забор воздуха извне происходит через особые пылеулавливающие приспособления. Так же, как и при самовентиляции, основными системами независимой вентиляции в тяговых двигателях постоянного тока являются параллельная и последовательная вентиляция. Параллельная вентиляция в большинстве двигателей осуществляется с прямым направлением движения воздуха (от коллектора), и лишь в ограниченном числе типов двигателей воздух проходит от задней стороны двигателя к коллектору. При подаче воздуха со стороны коллектора внутри якоря проходит относительно большое количество воздуха, благодаря чему значительно повышается длительная мощность двигателя, снижается температура петушков коллектора и его поверхности, обеспечивается интенсивная подача воздуха в камеру коллектора и исключается возможность скопления ионизированного воздуха над поверхностью коллектора. В результате этого существенно снижается возможность возникновения дуги между щетками. Чем ниже температура петушков коллектора, тем выше надежность работы обмотки якоря. Обмотка якоря при часовом режиме согласно нормам может иметь перегрев 120°С. С учетом допустимой температуры окружающего воздуха 25°С получим, что средняя температура, при которой может работать обмотка, равна 145°С. При столь высокой температуре оловянисто-свинцовый припой, которым припаивают выводы обмотки к петушкам, может расплавиться. При последовательной вентиляции, воздуха расходуется в 1,5 – 2 раза меньше, чем при параллельной. Таким образом, мощность, затрачиваемая при последовательной и параллельной вентиляции, будет приблизительно одинакова, но масса вентиляторной группы (вентилятор плюс его двигатель) при последовательной вентиляции получится меньше. Объясняется это тем, что этот вентилятор рассчитан на меньшую подачу воздуха с одновременным соответствующим повышением напора. При конструировании электродвигателей с последовательной вентиляцией необходимо изыскивать возможность обеспечивать максимально возможную площадь поперечного сечения каналов коллекторной втулки и осевых каналов сердечника якоря, поскольку в них скорость движения воздуха не должна превышать 25 м/с. Практика показывает, что площадь сечения вентиляционных отверстий в сердечнике якоря крупных электродвигателей составляет 55...80% суммарной площади сечения между катушками. При этом обеспечивается большая надежность тяговых электродвигателей в работе.

Контрольные вопросы:
1. Чем определяется допустимый уровень нагрева электрической машины?
2. Что такое установившийся режим работы?
3. Перечислите виды вентиляции в электрических машинах.
4. Какие виды потерь определяются режимами работы электрической машины?
5. Какие существуют способы охлаждения электрических машин?
6. Укажите основные направления снижения потерь в электрических машинах.

## Глава 7.
## НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ.
### 7.1. Искрение машин постоянного тока.

В соответствии с ГОСТ 28173 – 89 искрение на коллекторе электрической машины должно оцениваться по степени искрения под сбегающим краем щетки по шкале классов коммутации (табл. 7.1). При номинальном режиме работы машины степень ее искрения должна быть не выше $1^1/_2$. Причины искрения можно разделить по характеру их возникновения на механические и электрические. Признаком механического искрения являются искры красного, желтого или зеленого цвета, отлетающие от щеток. Зеленые искры – признак горения меди коллектора, красные – разрушения щеток. Электрические причины вызывают под щетками голубую искру. Причина – неудовлетворительное состояние магнитной цепи.

Учитывая многообразие причин искрения, нельзя указать исчерпывающие способы распознавания этих причин. Рассмотрим наиболее характерные неисправности машин постоянного тока и причины их возникновения.

1. Искрят все щетки или часть их:

• щетки установлены неправильно;

• расстояние между щетками отдельных бракетов (щеткодержателей) по окружности коллектора неравномерно;

• щетки находятся в плохом состоянии и неправильно установлены в щеткодержателях, имеют неровную обгоревшую рабочую поверхность с царапинами, набитыми медной пылью; плохо пришлифованы; их края обломаны или обгорели. Размеры обойм щеткодержателей не соответствуют размерам щеток (слишком велик или слишком мал зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя);

• щеткодержатели неправильно установлены, слишком велико расстояние между обоймой щеткодержателя и коллектором; установка реактивного щеткодержателя не соответствует направлению вращения (в результате этих недостатков щетка заклинивается); расстояние между щетками по окружности коллектора различно; неправильно выбрана марка щеток;

• щетки слабо (сильно) прилегают к коллектору;

• главные и добавочные полюса расположены неравномерно;

• между петушками коллектора или хомутиками имеется замыкание; в одной или в нескольких якорных катушках имеется межвитковое соединение или короткое замыкание; добавочные полюса слишком сильны или слишком слабы; зазор между якорем и отдельными или всеми добавочными полюсами чрезмерно мал или чрезмерно велик;

• межвитковое соединение или короткое замыкание в обмотке одного из добавочных или главных полюсов; ослабление контактов в цепи добавочных полюсов одной полярности;

• недостаточен контакт в якоре, наблюдается почернение лишь некоторых коллекторных пластин, находящихся на определенном расстоянии друг от друга (соответственно числу полюсов или пар полюсов); после каждой чистки или обточки коллектора чернеют одни и те же пластины; уравнительные соединения якоря отпаялись;

• изоляция между двумя или несколькими коллекторными пластинами выгорела; обрыв в секции обмотки якоря, находящейся между почерневшими пластинами коллектора; обрыв цепи секции петлевой обмотки.

2. Щетки искрят, хотя щеточный аппарат в порядке, щетки установлены правильно, коллектор чист и изоляция между коллекторными пластинами не выступает:

• недопустимо большой износ коллектора;

• повышенное нагревание якоря; машина перегружена.

3. Щетки оставляют черные полосы на коллекторе:

• поставлены угольные щетки несоответствующей марки (слишком мягкие или слишком твердые);

• использованы щетки разных сортов (нередко случается при замене сработавшихся щеток).

4. Щетки искрят, дрожат, сильно шумят; на коллекторе видны следы обгорания. Коллектор почернел по всей окружности или на большей ее части; поверхность коллектора испещрена бороздами (волнообразна); коллектор и щетки сильно нагреваются:
• неровности или биение коллектора;
• машина вибрирует;
• под действием центробежных сил коллектор деформирован;
• отдельные коллекторные пластины выступают;
• затяжка коллектора ослабла.
5. Наблюдается легкое круговое искрение; по поверхности коллектора со щеток одного полюса перескакивают искры на щетки другого полюса:
• коллектор загрязнен;
• установлены слишком мягкие угольные щетки.
6. Щетки сильно искрят при перемене направления вращения двигателя:
• изменение направления вращения двигателя производится слишком быстро;
• щетки стоят не на нейтрали.
7. Круговой огонь по коллектору:
• щетки расположены неправильно;
• сильно загрязнен коллектор.

*Таблица 7.1. Характеристики искрения электрических машин*

| Степень искрения (класс коммутации) | Характеристика степени искрения | Состояние коллектора и щеток |
|---|---|---|
| 1 | Искрение отсутствует (темная коммутация) | Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на щетках |
| $1\frac{1}{4}$ | Слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки | |
| $1\frac{1}{2}$ | Слабое искрение под большей частью края щетки | Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности бензином, а также следов нагара на щетках |
| 2 | Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки | Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности бензином, а также следов нагара на щетках |
| 3 | Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы | Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности бензином, а также подгар и разрушение щеток |

## 7.2. Неисправности машин постоянного тока.

Неисправности обмоток. Рассмотрим наиболее характерные неисправности обмоток и причины их возникновения.
1. Короткие замыкания в обмотке якоря:
• замыкание части витков одной секции или всей секции;
• замыкание между двумя секциями, лежащими в одном пазу;
• замыкание в лобовых частях обмотки;
• замыкание между любыми двумя точками обмотки, например, в случае пробоя обмотки на корпус в двух точках;
• замыкание обмотки якоря или коллектора на корпус.
2. Обрывы в обмотке якоря и плохой контакт в соединениях:
• при обрыве в петлевой обмотке возникает сильное искрение между коллекторными

пластинами, к которым присоединена секция, имеющая обрыв;
• при обрыве в простой волновой обмотке подгорает несколько пар коллекторных пластин, расположенных друг от друга на расстоянии шага по коллектору; число пар подгоревших пластин будет равно числу пар полюсов машины.
3. Повреждения в обмотке полюсов:
• повреждения в местах выводов концов катушек из корпуса;
• повреждение соединительных перемычек и наконечников.
4. Перегрев электрической машины:
• машина перегружена;
• при отсутствии искрения щеток возможна неисправность вентиляции машины;
• двигатель, предназначенный для кратковременной или повторно-кратковременной работы, эксплуатируется в продолжительном режиме.
5. Генератор плохо возбуждается, двигатель плохо идет в ход:
• межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или нескольких якорных катушках;
• велик ток возбуждения;
• произошло соединение параллельной обмотки с обмоткой добавочных полюсов или с последовательной обмоткой, в результате чего часть катушек шунтируется и ток возбуждения увеличивается.
**Неисправности генератора**. Ниже перечислены наиболее характерные неисправности генератора и причины их возникновения.
1. Ненормальное напряжение генератора. Генератор не возбуждается:
• генератор параллельного возбуждения потерял остаточный магнетизм;
• неправильное положение щеток;
• параллельная обмотка возбуждения заземлена в двух местах;
• межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках возбуждения;
• короткое замыкание в обмотке якоря, между пластинами или петушками коллектора;
• обрыв или недостаточный контакт в обмотке якоря или цепи возбуждения;
• сопротивление цепи возбуждения слишком велико.
2. Генератор возбуждается только при сильном нажатии щеток:
• слишком велико переходное сопротивление между коллектором и щетками вследствие загрязнения;
• неправильно выбран тип щеток.
3. Генератор дает напряжение ниже номинального:
• скорость вращения якоря ниже номинальной;
• катушки полюсов неправильно соединены между собой;
• межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках параллельной обмотки возбуждения.
4. Генератор при холостом ходе дает нормальное напряжение; при нагрузке его напряжение сильно падает:
• пониженная частота вращения первичного двигателя;
• неправильная полярность добавочных полюсов, т.е. неправильно чередуются главные и добавочные полюса;
• у генератора смешанного возбуждения МДС последовательной обмотки направлена встречно МДС параллельной обмотки.
5. Отключенный от сети генератор дает нормальное напряжение; щетки не искрят. При включении генератора в сеть напряжение падает, несмотря на нормальную частоту вращения якоря:
• параллельная обмотка или регулятор возбуждения соединены с корпусом;
• замыкание на корпус обмотки якоря.
6. Генератор дает повышенное напряжение при холостом ходе и при нагрузке.

Частота вращения якоря выше номинальной:
• катушки полюсов соединены не последовательно, а параллельно;
• неисправность первичного двигателя.

**Неисправности двигателя.** Ниже перечислены наиболее характерные неисправности двигателя и причины их возникновения.

1. Ненормальная частота вращения якоря. Двигатель не работает. В якоре нет тока:
• произошел обрыв в обмотке якоря или в пусковом реостате или в проводах;
• отсутствует контакт между щеткой и коллектором.

2. Ток в якоре имеется, но двигатель с нагрузкой не работает. Без нагрузки, развернутый от руки, развивает очень большую частоту вращения якоря:
• резко снижается величина магнитного потока;
• межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких катушках параллельного возбуждения;
• параллельная обмотка возбуждения соединена с корпусом или с другими обмотками, вследствие чего она частично или полностью шунтируется;
• параллельная обмотка возбуждения неправильно соединена с обмоткой якоря.

3. Двигатель не работает или работает с пониженной частотой вращения якоря. Щетки сильно искрят:
• обрыв или плохой контакт в обмотке якоря;
• межвитковое соединение или короткое замыкание в якоре.

4. Частота вращения якоря при номинальном напряжении превышает номинальную. Двигатель смешанного возбуждения развивает, кроме того, пониженный пусковой момент:
• щетки сдвинуты с нейтрали против направления вращения якоря;
• межвитковое соединение или короткое замыкание в одной или в нескольких параллельных катушках возбуждения;
• у двигателя смешанного возбуждения МДС последовательной обмотки направлена встречно МДС параллельной.

5. Частота вращения якоря при номинальном напряжении меньше номинальной:
• щетки сдвинуты с нейтрали по направлению вращения якоря;
• плохой контакт между щетками и коллектором.

### 7.3. Неисправности машин переменного тока.

Ниже перечислены наиболее характерные неисправности в обмотках двигателей переменного тока и синхронных генераторов и причины их возникновения.

1. Короткие замыкания в статорных и роторных обмотках асинхронных двигателей:
• повреждения витковой изоляции;
• повреждения корпусной изоляции.

2. Обрывы и плохой контакт в обмотках переменного тока:
• перегорание предохранителей;
• недостаточное прилегание контактов пусковой аппаратуры;
• плохой контакт щеток.

Контрольные вопросы

1. Назовите классы коммутации машин постоянного тока.
2. Назовите основные причины повреждения обмоток электрических машин.
3. Перечислите механические неисправности электрических машин.

## Глава 8. ТРАНСФОРМАТОРЫ.

### 8.1. Основные определения.

*Трансформатором* называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких

первичных систем переменного тока в одну или несколько других, вторичных систем, имеющих в общем случае другие характеристики, в частности, другое напряжение и другой ток. Трансформатор состоит из сердечника, набранного из листовой электротехнической стали, и обмоток, связанных между собой посредством электромагнитного поля. Трансформатор, имеющий две обмотки, называется *двухобмоточным*; трансформатор с тремя или несколькими обмотками – *трехобмоточным* или *многообмоточным*. Соответственно роду тока различают трансформаторы однофазные, трехфазные и многофазные. Под обмоткой многофазного трансформатора понимают совокупность всех фазных обмоток одинакового напряжения, определенным образом соединенных между собой. Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется первичной обмоткой $w_1$ а обмотка, от которой энергия отводится, называется вторичной $w2$. Соответственно все величины, относящиеся к первичной обмотке, как например, мощность, ток, сопротивление и т.д., тоже называются первичными, а относящиеся к вторичной обмотке – вторичными. Обмотка, присоединенная к сети с более высоким напряжением $U_1$ называется обмоткой высшего напряжения, а обмотка, присоединенная к сети меньшего напряжения $U_2$, – обмоткой низшего напряжения. Если вторичное напряжение меньше первичного, то трансформатор называется *понижающим*, а если больше – *повышающим*. Трансформатором с *ответвлениями* называется трансформатор, обмотки которого имеют специальные ответвления $w_3$ и $w_4$ для изменения коэффициента трансформации (рис. 8.1).

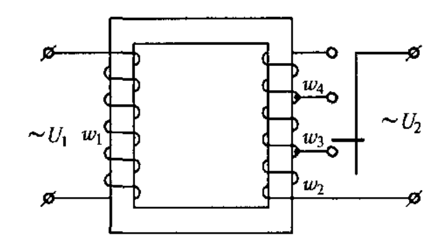



Рис. 8.1. Схема трансформатора с ответвлениями.

Для предотвращения вредного влияния воздуха на изоляцию обмоток и улучшения условий охлаждения трансформатора, сердечник с находящимися на нем обмотками помещают в бак, заполненный трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называются *масляными*. Трансформаторы, не погружаемые в масло, называются *сухими*. По своему назначению трансформаторы подразделяются на следующие типы:

• силовые – для передачи и распределения электроэнергии (тяговых подстанций);
• силовые специального назначения: тяговые, печные, для выпрямительных установок, сварочные и т.д.;
• индукционные регуляторы – для регулирования напряжения в распределительных сетях;
• автотрансформаторы – для преобразования напряжения в небольших пределах, для пуска в ход двигателей переменного тока и т.д.;
• измерительные – для включения в схемы измерительных приборов;
• испытательные – для производства испытаний под высоким напряжением (испытательные станции);
• устройства специального назначения, использующие принцип работы трансформатора.

При изучении трансформаторов, будем рассматривать одно- и трехфазный двухобмоточные силовые трансформаторы. Номинальные величины трансформатора – мощность, напряжение, ток, частота и т.д. – указываются на заводском щитке. Термин *номинальный* может применяться и к величинам, не указанным на щитке, но относящимся к номинальному режиму (например, номинальный КПД, номинальные температурные условия охлаждающей среды, номинальный cosφ и номинальные коэффициенты перегрузки). *Номинальным режимом* работы трансформатора называется режим, при котором трансформатор может

работать длительный период времени без нарушения показателей надежности и отклонения параметров.

*Номинальным вторичным напряжением* называется напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и при номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Если вторичная обмотка имеет ответвления, то ее номинальное напряжение отмечается особо.

*Номинальными токами* трансформатора – первичным и вторичным – называются токи, вычисленные по соответствующим значениям номинальной мощности и номинальных напряжений. С учетом того, что трансформатор имеет КПД, равный 0,99, считают номинальные мощности обеих обмоток равными.

## 8.2. Устройство трансформаторов.

Основные конструктивные элементы трансформатора – магнитная система, обмотки, системы изоляции и охлаждения, вводы.

**Магнитная система.** В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и тороидальные. *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. *Ярмом* называют часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют хорошие условия охлаждения. Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,28... 0,50 мм для частоты 50 Гц. Обычно применяют анизотропную холоднокатаную сталь с ребровой структурой (марки 3412 – 3416) и содержанием кремния 2,8...3,8%. По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы. В *стыковых* магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют раздельно, затем устанавливают встык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки. В *шихтованных* магнитопроводах стержни и ярма собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Каждый слой состоит из двух-трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают так, что листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя. В результате существенно уменьшается магнитное сопротивление в месте сочленения. При изготовлении магнитопроводов из холоднокатаной текстурованной стали листы в местах сочленения крайних стержней с ярмами скашивают примерно на 45°. В силовых трансформаторах широко применяют комбинированный способ шихтовки, при котором стыки листов ярма со средним стержнем делают прямыми, а с крайними стержнями – косыми, или первый слой листов выполняют с косыми стыками, а второй – с прямыми. Стержни магнитопровода в силовых трансформаторах сравнительно небольшой мощности имеют прямоугольное или крестовидное сечение, а в более мощных – ступенчатое, по форме приближающееся к кругу (их собирают из листов различной ширины). Такая форма обеспечивает получение требуемого поперечного сечения стержня при минимальном диаметре, что позволяет уменьшить длину витков обмоток и расход обмоточных проводов. При большом сечении стержней их собирают из отдельных стальных пакетов, между которыми располагают продольные каналы шириной 5...6 мм. для циркуляции охлаждающей жидкости. В некоторых конструкциях имеется еще и поперечный канал. В мощных трансформаторах с магнитопроводами из холоднокатаной анизотропной стали стержни стягивают бандажами из стеклоленты или стальной ленты. Чтобы стальные бандажи не образовали короткозамкнутых витков, их разрезают и стягивают с помощью изоляционных пряжек. Для получения равномерного сжатия стальных листов перед наложением бандажей стержень спрессовывают на сборочном стенде. Опрессовка стержней обеспечивает необходимую жесткость конструкции магнитопровода и предотвращает повышенную вибрацию его листов, сопровождающуюся шумом. Существуют также конструкции

магнитопроводов, в которых стержни стягивают стальными шпильками, изолированными относительно стержней трубками из изоляционного материала. Такой способ опрессовки для холоднокатаной стали недопустим, так как магнитные силовые линии огибают отверстия, пробитые в стальных листах для шпилек и, следовательно, отклоняются от направления проката стали. Ярма, соединяющие стержни, выполняют обычно прямоугольного, Т-образного или ступенчатого сечения, на 2...5% больше, чем сечение стержней. Это уменьшает индукцию в стали ярма и потери мощности в ней. Магнитопровод вместе с опорными балками и другими прессующими деталями образует остов трансформатора. При работе силовых трансформаторов их магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они могут приобрести электрический заряд. Чтобы избежать этого, остов заземляют с помощью медных лент.

**Обмотка.** В трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить как можно ближе друг к другу для лучшей магнитной связи. При этом на каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо концентрически – одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, либо чередующихся по высоте. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку низкого напряжения, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи – обмотку высокого напряжения. В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные концентрические (расщепленные) обмотки, в которых обмотку низкого напряжения делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку высокого напряжения. Обмотки трансформаторов изготовляют из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70% больше, чем при использовании меди, из-за большего удельного электрического сопротивления алюминия. В связи с этим габариты и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками. При сравнительно небольших мощностях и токах обмотки выполняют из изолированного провода круглого сечения, при больших мощностях и токах применяют провода прямоугольного сечения.

**Изоляция силовых трансформаторов.** В трансформаторах изоляцию обмоток подразделяют на главную (между обмотками низкого и высокого напряжения) и продольную (между витками, слоями и катушками каждой обмотки). Имеется также изоляция отводов от обмоток, переключателей и выводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется в основном электрической прочностью при частоте 50 Гц, Она обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов. Чтобы предотвратить пробой изоляции при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений в высоковольтных трансформаторах, между обмотками дополнительно ставят жесткие бумажно-бакелитовые цилиндры или мягкие цилиндры из электроизоляционного картона. Во избежание электрического разряда по поверхности изоляционных цилиндров они должны иметь по высоте большие размеры, чем обмотки. Между обмотками высшего напряжения различных фаз устанавливают межфазную изоляционную перегородку. Необходимое расстояние между обмотками и ярмом обеспечивают шайбами и прокладками из электроизоляционного картона. Между концевой изоляцией обмотки и ярмовыми балками магнитопровода в некоторых трансформаторах устанавливают металлические разрезные или неметаллические стягивающие кольца. В трансформаторах, рассчитанных на напряжение свыше 35 кВ, для защиты от грозовых разрядов две начальные и две конечные катушки обмотки высшего напряжения выполняют с усиленной изоляцией. Такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большего поперечного сечения. В трансформаторах напряжением 110 кВ для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки высшего напряжения и выравнивания электрического поля у концов обмотки

применяют емкостную компенсацию в виде экранирующих витков и емкостных колец, которые служат электрическими экранами. Изоляция между катушками, слоями и витками (продольная изоляция) обеспечивает электрическую прочность обмотки при частоте 50 Гц и воздействии импульсных перенапряжений. В трансформаторах с воздушным охлаждением изоляцию выполняют, как и во вращающихся электрических машинах, посредством изоляционных пленок и пропиточных лаков. Высокая стоимость изоляционных материалов и трудоемкость выполнения изоляции повышают общую стоимость таких трансформаторов по сравнению с масляными.

**Вводы трансформатора.** Для вывода наружу концов обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или на стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют вводом. Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность. Вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами, число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора. При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор пыли, масла и т.д. При напряжениях 110 кВ вводы часто выполняют составными – из двух фарфоровых изоляторов. Конструктивное выполнение трансформатора определяется в значительной мере способом его охлаждения, который зависит от номинальной мощности. В силовых трансформаторах для отвода теплоты от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воздушное, масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика.

**Трансформаторы с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы).** При естественном воздушном охлаждении магнитопровод, обмотки и другие части трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, поэтому охлаждение их происходит путем конвекции воздуха и теплоизлучения. Сухие трансформаторы устанавливают внутри помещений (в зданиях, производственных цехах и пр.), при этом главным требованием является обеспечение пожарной безопасности. Воздух обладает меньшей диэлектрической проницаемостью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Из-за меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах должны быть меньше, чем в масляных, поэтому они имеют большие сечения проводов обмотки и магнитопровода. Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных. Их устанавливают только в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха до 80% во избежание чрезмерного увлажнения обмоток. Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение. Трансформаторы типа СЗ закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ – герметическим кожухом. Сухие трансформаторы с охлаждением воздушным дутьем условно обозначают СД. Трансформаторы малой мощности выполняют, как правило, с охлаждением типа С. В некоторых случаях их помещают в корпус, залитый термореактивными компаундами на основе эпоксидных смол или других подобных материалов.

**Трансформаторы с масляным охлаждением.** В трансформаторах с естественным масляным охлаждением (М) магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный очищенным минеральным (трансформаторным) маслом. Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит теплоту от обмоток и магнитопровода трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем трансформатор. Погружение трансформатора в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции его обмоток и предотвращает ее увлажнение и потерю изоляционных свойств под влиянием атмосферных

воздействий. При правильной эксплуатации масляных трансформаторов, когда температура изоляции в наиболее нагретом месте не превышает 105°C, трансформатор может служить 20 – 25 лет. Повышение температуры выше нормы на 8°C приводит к сокращению срока службы изоляции трансформатора примерно в 2 раза. В трансформаторах мощностью 20...30 кВА выделяется сравнительно небольшое количество теплоты, поэтому их баки имеют гладкие стенки. У более мощных трансформаторов (20...1800 кВА) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают, применяя ребристые или волнистые стенки либо окружая бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет конвекции. Масляные трансформаторы типа М применяют для мощностей 10...10000 кВА.

**Трансформаторы с охлаждением негорючим жидким диэлектриком.** Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД помещают в герметизированный бак, заполненный негорючим жидким диэлектриком. Обычно применяют синтетические изоляционные материалы, например совтол, которые имеют примерно такие же электроизоляционные свойства и теплопроводность, как и трансформаторное масло. Трансформаторы с охлаждением типов Н и НД пожаробезопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Во время работы масло в трансформаторе нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы мощностью 25 кВА и выше имеют небольшой дополнительный бак-расширитель, соединенный с внутренней полостью основного бака. При нагревании трансформатора изменяется объем масла, находящегося в расширителе. Объем его составляет около 10% от объема масла в баке. Расширители имеют воздухо-осушитель, заполненный сорбентом – веществом, которое поглощает влагу из воздуха, поступающего в расширитель. При мощности 160 кВА и выше на них устанавливают также термосифонный фильтр для непрерывного обезвоживания и очистки масла. Для более надежного предохранения от окисления трансформаторы большой мощности выполняют герметизированными с полной изоляцией масла, находящегося в расширителе, от атмосферного воздуха. При повреждении изоляции обмотки высокого напряжения ее высокий потенциал может появиться на обмотке низкого напряжения. Чтобы предотвратить это, в трансформаторах у которых обмотка низкого напряжения имеет напряжение до 0,69 кВ, между этой обмоткой и заземленным баком включают пробивной предохранитель, который пробивается при напряжении 1000 В.

## 8.3. Принцип работы и КПД трансформатора.

Рассмотрим принцип действия трансформатора на примере однофазного двухобмоточного трансформатора, расчетная схема которого представлена на рис. 8.2. Этот трансформатор состоит из магнитопровода и двух расположенных на нем обмоток $w_1$ и $w_2$. Одна из обмоток подключается к источнику переменного напряжения $U_1$. Эта обмотка называется первичной. К другой обмотке с напряжением $U_2$ подключается потребитель $z_n$. Она называется вторичной. Действие трансформатора основано на принципе электромагнитной индукции: при протекании по первичной обмотке тока $I_1$ в стальном стержне магнитопровода возникает переменный магнитный поток, пульсирующий соответственно с частотой напряжения, питающего первичную обмотку. Переменный магнитный поток наводит в обеих обмотках ЭДС. Если цепь вторичной обмотки замкнута, ток в ней потечет – ток потребителя $I_2$.

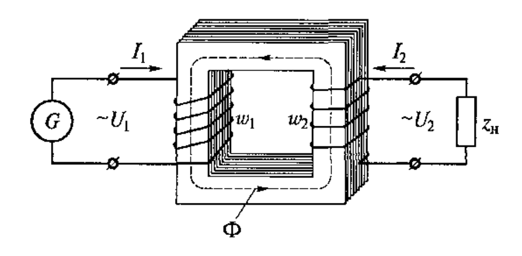



Рис. 8.2. Расчетная схема трансформатора.

При этом ЭДС первичной обмотки: $e_1 = -w_1(d\Phi / dt)$ (8.1)
а ЭДС вторичной обмотки: $e_1 = -w_2(d\Phi / dt)$ (8.2)
где $w_1$, $w_2$ - число витков первичной и вторичной обмоток соответственно. ЭДС, индуцируемые в обмотках трансформатора, прямо пропорциональны числу витков, а их отношение: $e_1 / e_2 = w_1 / w_2 = K$ (8.3)
называется коэффициентом трансформации. В первичной обмотке ЭДС $e_1$ является ЭДС самоиндукции и направлена встречно первичному напряжению $U_1$ т.е. находится с ним в противофазе. В связи с этим уравнение ЭДС для первичной обмотки имеет вид:

$$U1 = e_1 - e_{1р} - I_1r_1 \quad (8.4)$$

где $e_{1р}$ – ЭДС рассеяния; $r_1$ – активное сопротивление цепи первичной обмотки.
Обычно $e_{1р}$ и $I_1r_1$ невелики, поэтому с некоторым приближением можно считать, что подведенное напряжение $U_1$ уравновешивается ЭДС $e_1$. Во вторичной обмотке ток $I_2$ замкнутой цепи зависит от величины ЭДС $e_2$, которая в значительной части идет на создание напряжения на выводах вторичной обмотки $U_2$. Оставшаяся часть ЭДС $e_2$ идет на компенсацию ЭДС рассеяния $e_{2р}$ и падение напряжения в проводниках вторичной обмотки $I_2r_2$. Поэтому: $U_2 = e_2 - e_{2р} - I_2r_2$ (8.5)
Уравнение магнитодвижущих сил трансформатора имеет вид:

$$I_{xx}w_1 = I_1w_1 + I_2w_2 \quad (8.6)$$

Из этого уравнения следует, что сумма МДС первичной ($I_1w_1$) и вторичной ($I_2w_2$) обмоток равна постоянной величине – МДС холостого хода ($I_{xx}w_1$). Физически это объясняется следующим образом. Так как ЭДС вторичной обмотки $e_2$ является ЭДС взаимной индукции, то ток $I_2$ созданный этой ЭДС при подключении нагрузки, в соответствии с правилом Ленца, оказывает размагничивающее действие на магнитопровод трансформатора. Другими словами, ток $I_2$ создает МДС $I_2w_2$, направленную встречно МДС $I_{xx}w_1$. Но поскольку основной магнитный поток в магнитопроводе остается практически неизменным, то размагничивающее действие вторичного тока компенсируется увеличением тока в первичной обмотке до значения $I_1$.

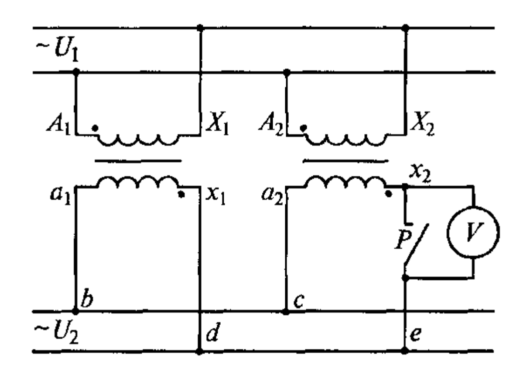



Рис. 8.3. Параллельное включение трансформаторов.

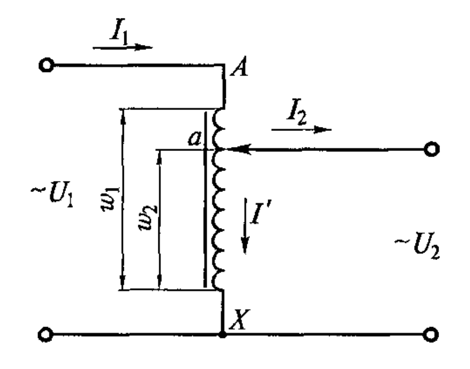



Рис. 8.4. Автотрансформатор.

Ток $I_1$ превышает ток $I_{xx}$ на величину, необходимую для компенсации размагничивающего действия МДС вторичного тока. Таким образом, любое изменение величины тока во вторичной обмотке трансформатора сопровождается соответствующим изменением первичного тока. В результате перемагничивания стали в магнитопроводе возникают потери энергии на гистерезис и вихревые токи. Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока холостого хода, которая не превышает 6... 8% номинальной мощности трансформатора. Если пренебречь этими потерями, то можно считать, что $P_1 \approx P_2$, т.е. мощности обмоток равны. Трансформаторы могут выполняться на любое число фаз, а также работать параллельно в зависимости от потребностей нагрузки. Параллельное включение трансформаторов (рис. 8.3) дает возможность при изменениях нагрузки включать или отключать один из трансформаторов, повышая тем самым коэффициент использования работающего трансформатора. Для преобразования напряжения вовсе не обязательно иметь две обмотки на сердечнике. Вполне можно обойтись одной обмоткой, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной системам. Электрическая схема такого трансформатора, называемого автотрансформатором (рис. 8.4), широко распространена на подвижном составе. Для автотрансформатора сохраняются соотношения для ЭДС:

$$e_2 / e_2 = w_1 / w_2 \quad (8.7)$$

и для тока: $$I_1 / I_2 = 1 / К \quad (8.8)$$

но поскольку $I_1$ и $I_2$ (токи первичной и вторичной обмоток) направлены противоположно, то в общей части обмотки результирующий ток равен их разности:

$$I = I_1 - I_2 \quad (8.9)$$

что дает возможность выполнять общую часть обмотки проводом меньшего сечения. Трансформаторы нормируются не по активной (действительной), а по кажущейся мощности ($S_{ном}$), равной: $$S_{ном} = U_{1ном} I_{1ном} \quad (8.10)$$

которая является основной паспортной характеристикой трансформатора.

Активная мощность: $$P_{1ном} = S_{ном} \cos\varphi \quad (8.11)$$

зависит от cosφ, т.е. от характера нагрузки (свойств потребителя мощности), и не может характеризовать трансформатор. С другой стороны, потери и КПД трансформатора зависят от активных мощностей первичной и вторичной обмоток. Итак, потери в трансформаторе определяются выражением: $\sum P = P_1 - P_2 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 - U_2 I_2 \cos\varphi_2$ (8.12)

а КПД: $$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / P_2 + \sum P \quad (8.13)$$

За номинальное значение КПД принимается его величина при номинальных токах и напряжениях и при cosφ = 0,8. Потери в трансформаторе разделяются на постоянные и переменные. Постоянные – это магнитные потери в стали сердечника. Они связаны с его непрерывным перемагничиванием и являются функцией магнитного потока и частоты тока, но не зависят от нагрузки. Переменные потери возникают в обмотках трансформатора: $\Delta P_1 = I^2{}_1 r_1$ и $\Delta P_2 = I^2{}_2 r_2$, где $r_1$ и $r_1$ – омическое сопротивление первичной и вторичной обмоток. На холостом ходу потери во вторичной обмотке отсутствуют, поэтому магнитные (постоянные) потери составляют потери холостого хода трансформатора. При малых полезных нагрузках трансформатора сильно сказывается влияние постоянных потерь. Поскольку угол сдвига между током и напряжением зависит от параметров нагрузки, то в паспорте трансформатора нормируются не потери, а падение напряжения в обмотках при номинальном значении тока. При этом нормируется отношение полного падения напряжения, соответствующего номинальному току, $U_{zном}$ к номинальному первичному напряжению $U_{lном}$ выраженное в процентах:

$$e_x = (U_{zном} / U_{lном})100 \quad (8.14)$$

Для больших трансформаторов величина $e_x$ не должна превышать 5... 6%. Величина

$$U_{zном} = e_x\, U_{lном} / 100 \quad (8.15)$$

называется *напряжением короткого замыкания* трансформатора. Если замкнуть накоротко вторичную обмотку, то для получения номинальных токов $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ потребуется подвести к зажимам первичной обмотки напряжение $U_{zном}$. Зависимость напряжения вторичной обмотки $U_2$ от токов нагрузки $I_{2н}$ называется рабочей характеристикой трансформатора.

Контрольные вопросы:
1. Может ли трансформатор работать при несинусоидальном токе?
2. Почему сердечники трансформаторов изготавливают шихтованными?
3. Чем отличаются конструкции трансформаторов и магнитных усилителей?
4. В чем состоит отличие конструкций трансформатора и автотрансформатора?
5. Объясните необходимость параллельного включения трансформаторов.
6. Чем вызваны потери в трансформаторах?

## Глава 9. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ.
### 9.1. Устройство аккумуляторов.

Аккумулятор – это устройство для накопления энергии с целью ее последующего использования. Обычно аккумуляторы соединяют в батареи для получения необходимого напряжения или емкости. Существуют кислотные и щелочные аккумуляторы. В *кислотном* аккумуляторе отрицательные пластины состоят из губчатого свинца (Pb), а положительные – из оксидов свинца (свинцового сурика) $PbO_2$. Порошкообразный оксид свинца запрессовывают в свинцовую решетку. При воздействии электролита, состоящего из раствора серной кислоты ($H_2SO_4$) в дистиллированной воде ($H_2O$), при разряде происходит реакция: $PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$ (9.1)
Соединение $PbSO_4$ – сульфат свинца – образуется как на положительных, так и на отрицательных пластинах. При заряде аккумулятора сульфат свинца разлагается на образующие его вещества, и состояние аккумулятора восстанавливается. При образовании $PbSO_4$ в реакции участвует кислота электролита, поэтому плотность электролита зависит от степени заряженности аккумулятора. Заряженный аккумулятор имеет большую плотность, а разряженный – меньшую плотность электролита. По плотности электролита можно определить степень его зарядки, зная плотность первоначально залитого электролита.
В *щелочном* аккумуляторе отрицательные пластины состоят из железа (Fe), а положительные – из гидроксида никеля $Ni(OH)_2$, электролитом является водный раствор гидроксида калия (едкое кали) KOH. Токообразующая реакция протекает следующим образом:

$$Fe + 2NiOOH + 2H_20 \leftrightarrow Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \quad (9.2)$$

Электролит в реакции не участвует, и его плотность с изменением состояния заряженности аккумулятора не меняется. К щелочным аккумуляторам относятся также никель-кадмиевые (КН) аккумуляторы. В системах электропневматических тормозов применяются никель-кадмиевые аккумуляторы 40КН-10, не отличающиеся по конструкции и обслуживанию от любого щелочного аккумулятора, но имеющие большую удельную емкость. Как любое техническое устройство, аккумулятор имеет коэффициент полезного действия, определяемый отношением полезной емкости, выраженной в ампер-часах (А×ч), к энергии, затраченной на зарядку, выраженной также в ампер-часах. КПД аккумуляторов изменяется в широких пределах и зависит от его назначения, температуры электролита, величины разрядного тока и ряда других величин. Емкость аккумулятора также величина непостоянная. В обозначении типа аккумулятора содержится число, характеризующее его номинальную (паспортную) емкость, которая может быть получена при разряде его номинальным током. Величину номинального тока можно получить делением величины номинальной емкости на 10 для кислотных и на 5 для щелочных аккумуляторов. Например, кислотный аккумулятор емкостью 450 Ач имеет нормальный ток 45 А, а щелочной такой же емкости – 90 А. Величина разрядного тока очень сильно влияет на емкость, которую можно снять с аккумулятора (полезная емкость), особенно это заметно при стартерном разряде. Щелочные аккумуляторы более стойки к большим токам, нежели кислотные. Конструкция пластин аккумулятора определяет его срок службы. Пористые пластины кислотного аккумулятора плохо переносят вибрацию и большие кратковременные (стартерные) токи; отрицательная температура электролита приводит к снижению емкости аккумулятора, а замерзание электролита – к разрушению пластин. Щелочные аккумуляторы устойчивы к

воздействию отрицательных температур. На подвижном составе в основном устанавливаются тяговые (рассчитанные на большие длительные токи), стартерные (рассчитанные на очень большие, но кратковременные токи) и осветительные (рассчитанные на разрядные токи, не превышающие номинального значения) аккумуляторы. Принципиальные различия их заключаются в количестве и толщине пластин с активной массой. При использовании аккумуляторов на подвижном составе их соединяют в батареи. Для получения необходимого напряжения (напряжение одного кислотного аккумулятора составляет 2,2 В, щелочного – 1,2 В) аккумуляторы включают последовательно, при параллельном соединении обеспечивается необходимый по величине ток нагрузки. Стартерные аккумуляторные батареи тепловозов предназначены для питания стартера при пуске дизеля, а также цепей управления, вспомогательных и освещения при неработающем дизеле. Конструкция и емкость аккумуляторной батареи определяются пусковым режимом – кратковременным разрядом, при котором токи достигают 2500 А. При этом напряжение батареи должно обеспечивать необходимую для пуска частоту вращения вала дизеля при прокрутке. На тепловозах применяются кислотные и щелочные аккумуляторные батареи. Основными типами батарей для выпускаемых тепловозов являются кислотные аккумуляторные батареи 32ТН-450, -550 или 48ТН-450. В зависимости от напряжения вспомогательных цепей тепловоза эти батареи состоят из 32 (при напряжении вспомогательного генератора $U_{вг}$ = 75 В) или 48 (при $U_{\text{вг}}$ = 110 В) элементов (аккумуляторов) с нормальной емкостью 450 или 550 Ач. Номинальная емкость может быть определена путем разряда аккумуляторов током 10-часового режима. Как уже говорилось, значение номинального тока определяется делением номинальной (паспортной) емкости на 10. Промышленность выпускает кислотные аккумуляторные батареи 48ТН-350, щелочные никель-железные 68ПНЖК-250, 48ТНЖТ-400, никель-кадмиевые 72ТПНК-250-02 и др. Основные параметры отечественных тепловозных аккумуляторных батарей приведены в табл. 9.1.

*Таблица 9 1. Параметры отечественных тепловозных аккумуляторных батарей*

| Параметр | Тип батареи | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 32ТН-450У2 | 48ТН-450У2 | 48ТН-350У2 | 46ТПНЖ-550У2 | 72ТПНЖ-250-02У2 |
| Номинальная емкость, Ач | 450 | 450 | 350 | 550 | 250 |
| Номинальное напряжение, В | 64,0 | 96,0 | 96,0 | 57,5 | 90,0 |
| Тренировочный режим разряда и ток, Ач | 10/45 | 10/45 | 10/35 | 5/100 | 10/25 |
| Конечное напряжение, В, не менее | 57,6 | 86,6 | 86,6 | 46,0 | 72,0 |
| Режим пуска дизеля, толчковый разряд, напряжение В, не менее | 32 | 48 | 48 | 25 | 47 |
| Ток, А | 1700 | 1700 | 1800 | 2200 | 1800 |
| Установившийся разряд, напряжение В, не менее | 46,4 | 69,6 | 70,0 | 46,0 | 72,0 |
| Ток, А | 900 | 900 | 800 | 900 | 800 |
| Масса с электролитом, кг, аккумулятора | 38 | 38 | 30 | 45 | 26 |
| Масса с электролитом, кг батареи | 1270 | 1930 | 1710 | 2100 | 1870 |

Обозначение типа батареи включает в себя следующие цифры и буквы.
• 32, 46, 48, 68, 72 – количество последовательно включенных аккумуляторов, шт.;
• 550, 450, 350, 250 – номинальная емкость, Ач; ТП – назначение: тепловозная (пусковая);
• Н – вид электродных пластин: намазные; НЖ, НК – никель-железный, никель-кадмиевый;
• К, Т – конструкция электродов: комбинированная, таблеточная; У – для умеренного климата; 2 – категория размещения: в кузове, в металлическом шкафу.

**Устройство кислотного аккумулятора.** Кислотный аккумулятор ТН-450 (рис. 9.1) состоит из эбонитового корпуса (банки) 5 с ребрами для установки блоков пластин и углублений для шлама, в который погружены 19 положительных 7 и 20 отрицательных 6 пластин. Каждая пластина представляет собой отлитую из свинцово-сурьмянистого сплава (95% свинца и 5% сурьмы) решетку, ячейки которой заполнены активной массой. Пластины изолированы друг от друга сепараторами 8 из синтетических материалов или дерева (чаще всего ольхи). Сверху все положительные пластины соединены между собой в блок 7, который посредством гаек, шайб и резиновых уплотнений укреплен на эбонитовой крышке 2 аккумулятора. Аналогично выполнен блок отрицательных пластин 6. Каждый блок имеет по два вывода – борна 1. В крышке 2 предусмотрено отверстие для заливки электролита и воды, закрываемое пробкой 3, которая обеспечивает свободный выход газов из аккумулятора, но препятствует проникновению в него воздуха. Для удобства транспортировки, монтажа и защиты аккумуляторов от механических повреждений их монтируют в деревянных ящиках. При разряде аккумулятора на пластинах обеих полярностей образуется сульфат свинца ($PbSO_4$), и плотность электролита при этом снижается. Сульфатация происходит также при систематическом недозаряде батареи, слишком глубоком разряде, применении электролита с повышенной плотностью, работе батареи при высокой температуре электролита, загрязнении его и длительном хранении аккумуляторов без подзаряда. Электролитом для кислотных батарей служит раствор аккумуляторной серной кислоты в дистиллированной воде. Плотность его в заряженных аккумуляторах должна составлять 1,24... 1,25 г/см$^3$, в зимние месяцы для предотвращения замерзания ее повышают до 1,26 г/см$^3$.

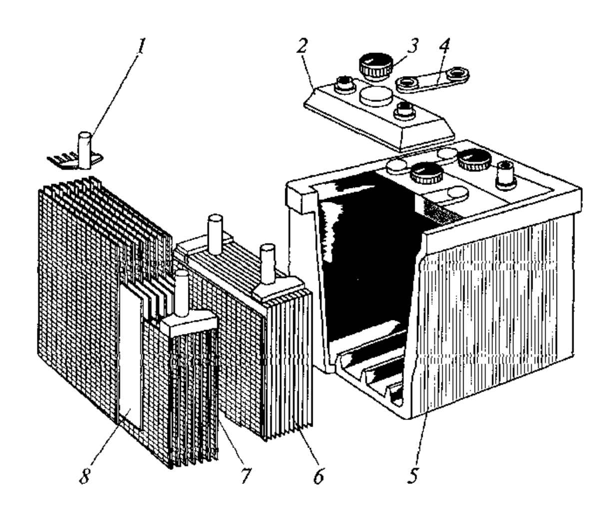



Рис. 9.1. Конструкция кислотного аккумулятора.
1 – борн (вывод), 2 – крышка, 3 – пробка, 4 – перемычка, 5 – эбонитовый корпус,
6– блок отрицательных пластин, 7– блок положительных пластин,
8 – сепаратор.

Дальнейшее увеличение плотности электролита несколько повышает напряжение на элементе, но резко снижает его срок службы вследствие разрушения отрицательных пластин. Особенно это выражено при высокой интенсивности разряда, который имеет место при пуске дизеля. Для уменьшения коррозии решеток положительных пластин целесообразно снижать концентрацию электролита до 1,22 г/см$^3$, что приводит к увеличению срока их службы, при этом мощность батареи возрастает, а вероятность ее замерзания практически отсутствует. Если существует вероятность замерзания электролита, плотность снижать нельзя. При замерзании электролита пластины разрушаются, и батарея становится непригодной для работы. Следует отметить, что вероятность замерзания аккумуляторных батарей, расположенных в кузове тепловоза, значительно меньше, чем при расположении их в раме или нише топливного бака. В последнем случае необходим обогрев батарей.

**Устройство щелочного аккумулятора.** Щелочной аккумулятор (рис. 9.2) имеет два блока 3

положительных и отрицательных пластин, которые размещены в стальном сосуде (банке) 7. Пластины представляют собой ламели (коробочки), соединенные между собой в замок и укрепленные стальными ребрами 8, к которым приварены контактные планки. Пластины изолированы перфорированными сепараторами 7 и резиновыми шнурами. Каждый блок имеет два борна 6, выведенных через отверстия в крышке и изолированных винипластовыми и резиновыми кольцами, препятствующими вытеканию электролита. Банка 1 аккумулятора окрашена снаружи эпоксидной эмалью и защищена резиновым чехлом (изоляция банки 2). В заряженном аккумуляторе активными элементами являются гидроксид никеля (NiO) – положительный электрод и железо (Fe) – отрицательный электрод. В качестве электролита используется 20%-ный водный раствор гидроксида калия (KOH) или натрия (NaOH) плотностью 1,19... 1,21 г/см$^3$ с добавкой 20 г/л гидроксида лития (LiOH), улучшающего условия работы активной массы. Электролит приготовляют в стальной сварной емкости. Запрещается пользоваться оцинкованной, луженой, медной, свинцовой или керамической емкостью. Электролит щелочных аккумуляторов в реакции не участвует, плотность его во время работы батареи не изменяется. Это несколько осложняет контроль за состоянием батареи в эксплуатации. Недостатком щелочных аккумуляторов можно считать большую массу и плохую работу при понижении температуры электролита до 0°С.

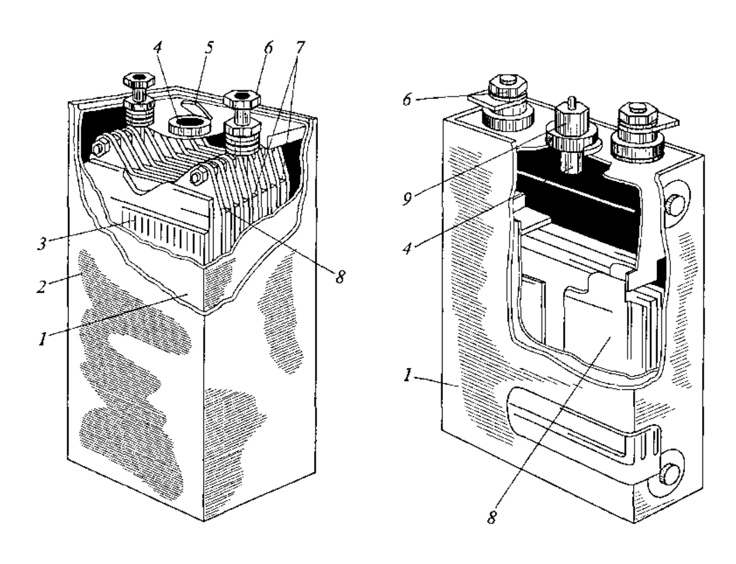



Рис. 9.2. Варианты исполнения щелочного аккумулятора.
1 – банка; 2 – изоляция банки; 3 – блок пластин; 4 – клапан; 5 – крышка клапана;
6 – борн; 7 – сепараторы; 8 – стальные ребра; 9 – пробка.

Никель-железные аккумуляторы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с кислотными:

• больший срок службы (до 10 лет);
• изготовляются из менее дефицитных материалов;
• способны выдерживать большие зарядные и разрядные токи без ущерба для аккумулятора и без значительного снижения полезной емкости;
• отсутствие сульфатации, губительно действующей на кислотные аккумуляторы;
• большая механическая прочность;
• нечувствительность к замерзанию электролита;
• простота обслуживания и ремонта.

В настоящее время существует технология изготовления безламельных аккумуляторов, позволяющая отказаться от запрессовки активной массы в металлические ламели. Уход за батареей в эксплуатации сводится к доливке дистиллированной воды и содержанию аккумуляторов в чистоте. Аккумуляторы не требуют ремонта, уход за ними сводится к промывке при содержании в электролите углекислоты более 17,5 г/л. Разработаны методы восстановления щелочных аккумуляторов, имеющих пониженную емкость. Для

аккумуляторов обоих типов характерно снижение полезной емкости с увеличением тока разряда. У кислотных аккумуляторов это явление особенно резко выражено и связано со снижением плотности электролита в пограничных с пластинами слоях. В результате происходит увеличение внутреннего сопротивления и падение напряжения в аккумуляторе. У щелочных аккумуляторов ухудшение характеристик связано с процессом поляризации электродов. Это явление усиливается при разряде батареи на стартерный (пусковой) электродвигатель, когда весь процесс протекает за 5...20 с, т.е. за время, недостаточное для равномерной диффузии электролита в элементах. Емкость батареи, затрачиваемая на один пуск дизеля, не превышает 4 Ач, но общая полезная емкость после пуска практически уменьшается в несколько десятков раз. С течением времени плотность электролита выравнивается и полезная емкость восстанавливается, хотя и не полностью. Поэтому необходима выдержка между пусками дизеля 2...3 мин. С понижением температуры проводимость электролита уменьшается, что приводит к росту потерь внутри батареи и ограничивает полезную емкость (рис. 9.3). Кроме того, при пониженной температуре увеличивается плотность электролита, ухудшается его циркуляция в аккумуляторе и снижается полезная емкость, которую может отдать аккумулятор при разряде. Особенно неблагоприятно понижение температуры сказывается на работе кислотных аккумуляторов, плотность электролита которых находится в прямой зависимости от степени заряда. Следовательно, внутреннее сопротивление батареи зависит от остаточной емкости и плотности электролита одновременно. У щелочных аккумуляторов внутреннее сопротивление практически зависит только от остаточной емкости, поэтому работа щелочных элементов более устойчива.

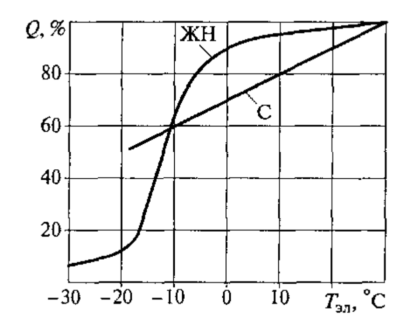



Рис. 9.3. Зависимость емкости аккумулятора от температуры электролита.
ЖН – электролит КОН, плотность 1,18 г/см$^3$; С – электролит $H_2SO_4$, плотность 1,24 г/см$^3$

Необходимость сохранить достаточное для пуска дизеля напряжение в любых условиях эксплуатации и при больших разрядных токах заставляет увеличивать размеры и количество пластин в аккумуляторе. Одновременно с увеличением рабочей поверхности пластин возрастает номинальная емкость, так как увеличивается количество активных материалов. Рост номинальной емкости является в данном случае желательным, так как компенсирует снижение емкости под воздействием низкой температуры и разрядного тока. Однако это приводит к увеличению массы и стоимости аккумуляторов. Анализ процесса пуска дизеля показывает, что пиковый ток значительно превосходит необходимый для создания «момента отрыва» вала дизеля и может быть значительно уменьшен, что приведет к улучшению условий работы аккумуляторов без ухудшения пускового режима. Существует несколько способов уменьшения пикового тока. Наибольшее распространение получило параллельное включение аккумуляторных батарей двух секций тепловоза. При такой схеме пуска пиковый ток аккумуляторов сокращается в два раза. Разряд батареи при прокрутке вала может быть резко сокращен применением в схеме ускорителя пуска – устройства, выставляющего рейки топливных насосов «на подачу» до начала работы регулятора частоты вращения вала дизеля. Аккумуляторные батареи, используемые в пассажирских вагонах, служат для питания энергией основных потребителей на стоянках и воспринимают на себя пиковые нагрузки при

работающем генераторе, чем поддерживают заданный уровень напряжения. Вагонные аккумуляторы могут быть как кислотными, так и щелочными, которым отдается предпочтение. При напряжении в электрических цепях вагона 50 В устанавливается 40 щелочных или 26 кислотных аккумуляторов, а при 110 В – 56 кислотных или 86 щелочных аккумуляторов, соединенных последовательно. В электрических цепях вагонов используются в основном следующие типы аккумуляторов:
кислотные: ВН-440 (Россия), ВГТ-390 (Германия), RPg-300 (Индия); щелочные: ВНЖ-300У2 (Россия), 915633-375 (Германия).
На отечественных электровозах и мотор-вагонных поездах используются аккумуляторы типа КН-125, из которых составляются батареи 40КН-125, обеспечивающие напряжение рабочей сети 50 В. Электровозы чешского производства серии ЧС имеют аккумуляторные батареи 40КН-125, правила эксплуатации которых аналогичны щелочным аккумуляторам отечественного выпуска. Электропоезда метрополитена оборудуются аккумуляторами НКН-80, НКН-55, соединенными в батареи на любое необходимое напряжение.

## 9.2. Приготовление электролита.

Электролит для кислотных аккумуляторов приготовляется путем разбавления аккумуляторной серной кислоты дистиллированной водой. Кислота применяется концентрированная с удельным весом 1,83...1,84 г/см$^3$ или частично растворенная до 1,40 г/см$^3$. Плотность кислоты и электролита измеряется ареометром. При разбавлении концентрированной серной кислоты раствор сильно нагревается. Во избежание попадания брызг кислоты на кожу рук, лицо и одежду персонала, приготавливающего электролит, всегда следует наливать кислоту в воду, а не наоборот. Раствор следует непрерывно перемешивать, пока кислота подливается в воду, чтобы более тяжелая кислота не опускалась на дно сосуда, не перемешиваясь с водой. Если требуется изменить концентрацию электролита в элементе, доливать следует только дистиллированную воду, а не электролит.
При полном заряде в зависимости от назначения батареи может быть рекомендована следующая плотность электролита, г/см$^3$:
Стационарные: 1,250...1,225
Тяговые: 1,260...1,280
Стартерные: 1,260...1,300
Вагонные: 1,210...1,230
Плотность измеряется ареометром при 18°С. При другой температуре электролита плотность пересчитывается по таблице. Аккумуляторы, имеющие разную плотность электролита, имеют и разное напряжение на борнах. Применение дистиллированной воды обусловлено наличием в природной воде вредных для аккумуляторов примесей. Так, нитраты в концентрации 0,001% заметно увеличивают сульфатацию пластин, стимулируя саморазряд. Органические соединения (крахмал, сахар и др.) отрицательно влияют на положительные пластины, вызывая их разрушение. Железо, соляная кислота, марганец, хлор и его соединения разрушают пластины аккумуляторов, снижая их полезную емкость. Для увеличения времени между зарядами применяют присадки к электролиту. Электролитом для щелочных никель-железных аккумуляторов служит раствор гидроксида калия. К этому раствору добавляется обычно небольшое количество гидроксида лития (едкого лития), который оказывает полезное влияние на срок службы аккумулятора, но не является необходимым для реакций, происходящих в аккумуляторе. Гидроксид калия – белое вещество, хорошо растворяется в воде, при хранении на открытом воздухе поглощает углекислый газ и влагу, поэтому электролит не должен соприкасаться с воздухом как при его хранении, так и в процессе работы. Электролит приготовляется с соблюдением тех же предосторожностей, что и при приготовлении кислотного. Значения плотности щелочного электролита приводятся для температуры 18°С. Если приготовление электролита происходит при другой температуре, то следует прибавить к цифре третьего десятичного знака по

единице на каждые 2°C, если температура выше стандартной, и вычесть по единице на каждые 2°C, если она ниже. Однако это правило не пригодно для кислотных аккумуляторов. Ниже приведены параметры щелочного электролита в зависимости от содержания щелочи:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Содержание KOH,% | 15 | 20 | 20 | 30 | 35 | 40 |
| Плотность при 18°C, г/см$^3$ | 1,140 | 1,188 | 1,239 | 1,290 | 1,344 | 1,399 |
| Температура замерзания электролита,°C | - 15 | - 24 | - 38 | - 59 | - | - |

Гидроксид лития добавляется из расчета 20 г/л. При понижении плотности электролита в эксплуатируемой батарее доливать следует электролит, так как его компоненты в аккумуляторе выпадают в осадок, соединяясь с диоксидом углерода (углекислотой), содержащимся в воздухе. К вредным загрязнениям щелочных электролитов относятся диоксид углерода (углекислый газ), содержащийся в воздухе, и все виды кислот. Реакция с кислотами настолько бурная, что недопустимо содержать в одном помещении кислотные и щелочные аккумуляторы. В качестве электролита может быть использован гидроксид натрия (NaOH, или едкий натр), обладающий теми же свойствами, что и KOH. Однако калиевый электролит считается универсальным, а натриевый – летним, способным работать только при положительных температурах.

## 9.3. Способы заряда аккумуляторов.

Заряд аккумуляторов производится только постоянным или пульсирующим токами. Общеприняты две системы зарядки: при постоянной величине тока или при постоянном напряжении. Положительный зажим источника напряжения соединяется с положительным зажимом батареи, отрицательный – с отрицательным.

**Заряд при постоянной величине тока.** Величина зарядного тока регулируется либо величиной зарядного напряжения, либо включением в цепь аккумуляторов добавочного сопротивления. Изменение напряжения предпочтительнее, так как не вызывает дополнительных потерь. При заряде от выпрямителя обычно используется дополнительное переменное сопротивление. Заряд производится номинальным током и продолжается до «кипения» электролита. Появление пузырьков на поверхности электролита сигнализирует о том, что дальнейший заряд током этой величины аккумулятором не воспринимается, и зарядный ток идет на разложение воды, что одновременно начинает разрушать пластины. Для более полного заряда можно продлить процесс, уменьшив зарядный ток в 2 раза, с последующим доведением до «кипения». Процесс может быть продолжен, если не достигнуто постоянство плотности электролита. Такой заряд, если он содержал два-три уровня изменения тока, называют уравнительным. Он полезен для состояния пластин, которые при этом освобождаются от всего имеющегося на них сульфата. Заряд аккумуляторов сопровождается нагревом электролита, поэтому при достижении им температуры 40...45°C следует делать перерыв.

**Заряд при постоянной величине напряжения источника тока.** Батарея ставится на заряд при постоянном напряжении источника. Это напряжение должно оставаться постоянным независимо от тока заряда, величина которого меняется от большего в начале заряда до установившегося значения. Этот способ заряда за свою простоту часто применяется на всех видах подвижного состава и транспортных средств. Источником тока служат вспомогательные генераторы локомотивов, генераторы вагонов и т.д., напряжение которых устанавливается на 2...3 В выше номинального напряжения аккумуляторных батарей. Однако процесс заряда происходит в течение всего времени работы подвижного состава, что приводит к перезаряду аккумуляторов, «кипению» электролита и довольно быстрому разрушению пластин. В стационарных условиях заряда аккумуляторных батарей этот способ недостатков не имеет.

## 9.4. Причины неисправностей аккумуляторов.

Работоспособность аккумуляторных батарей зависит от условий, в которых они эксплуатируются. Плохое обслуживание батареи может сделать ее неисправной гораздо раньше окончания срока службы. Рассмотрим основные причины неисправности батареи.

1. Перезаряд аккумулятора – вызывает коррозию решеток положительных пластин и газообразование, разрушающее активный материал пластин, особенно положительных. Шлам (материал разрушения пластин), оседая на дно банки, может замкнуть пластины. При перезаряде увеличивается температура электролита, происходит излишнее разложение воды, в результате чего оголяются пластины и требуется доливка воды.

2. Недозаряд (систематический) – вызывает постепенную порчу аккумулятора. Возможна переполюсовка аккумулятора в батарее и коробление пластин в результате накопления на них сульфата свинца.

3. Коррозия зажимов (борнов) – увеличивает сопротивление цепи, уменьшая отдачу батареи.

4. Треснувшие банки – вызывают утечку электролита, оголение пластин и потерю работоспособности. Особенно вредно вытекание электролита для отрицательных пластин.

5. Короткие замыкания внутри аккумулятора – возникают в результате повреждения сепараторов дендритами кристалла сульфата либо замыкания пластин шламом. Признаком короткого замыкания является снижение плотности электролита, низкое напряжение на аккумуляторе, потеря общей емкости батареи. Определить аккумулятор с внутренним замыканием можно при разомкнутой цепи обычным компасом.

6. Пониженный уровень электролита – в результате несвоевременной доливки приводит к последствиям, рассмотренным ранее. Возможно коробление пластин.

7. Замерзание электролита – происходит в результате его низкой плотности, губительно действует на пластины аккумулятора.

8. Сульфатация – образование сульфата свинца на поверхности и в порах положительных пластин. При этом ухудшается работа аккумулятора, снижается плотность электролита, коробятся пластины. При саморазряде сульфат свинца прочной пленкой покрывает активную массу пластин, обусловливая снижение емкости аккумуляторной батареи. Такое же негативное влияние оказывает колебание температуры электролита.

9. Перемена полярности аккумулятора – вызывается перезарядом аккумулятора, имеющего недостаточную емкость и соединенного с другим, большей емкости. Явление нежелательное.

10. Взрывы – при работе (особенно при заряде) выделяются водород и кислород, являющиеся взрывоопасными и легко воспламеняющимися газами, поэтому аккумуляторные отсеки и помещения должны иметь приточно-вытяжную вентиляцию. Открытый огонь вблизи батареи запрещен. Соединение и разъединение элементов во время заряда опасны, так как могут возникать искры. Составляющие батарею аккумуляторы обычно монтируются в блоки по несколько элементов, которые затем размещаются в ящиках кузовов. Расположение кузовов на подвижном составе должно обеспечивать естественную либо принудительную вентиляцию из расчета 100 $м^3/ч$ воздуха. Для улучшения изоляции блоков аккумуляторов от корпуса подвижного состава их устанавливают на дополнительные изоляторы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные характерные особенности имеют кислотные и щелочные аккумуляторы?
2. Почему нельзя хранить и обслуживать совместно кислотные и щелочные аккумуляторы?
3. Какие из аккумуляторов – кислотные или щелочные – можно считать перспективными и почему?
4. Почему заряд аккумуляторов при постоянном напряжении вредит состоянию пластин?
5. В каких случаях применяют последовательное, параллельное и смешанное соединение аккумуляторных элементов?

## Глава 10.
## СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.
### 10.1. Особенности работы тяговых преобразователей на локомотивах.

Работа локомотивных тяговых преобразователей характеризуется наличием значительных перенапряжений, воздействующих на элементы преобразователя, при колебаниях напряжения источника питания, срабатывании защиты, боксовании локомотива и т.д. Преобразовательные установки тепловозов находятся в более легких условиях, чем электровозные, но приходится учитывать имеющие место четырех- и пятикратные по отношению к номинальным перенапряжения. Нагрузка преобразовательных устройств локомотивов резко переменна, что связано с режимом ведения поезда, боксованием колесных пар, изменением напряжения тягового генератора по заданным законам. Силовая электроника связана с преобразованием большого количества энергии, поэтому основное внимание уделяется получению наибольшего КПД преобразователей. Термин «преобразователь» используют безотносительно к назначению силовых электронных устройств. Однако для разных целей были разработаны различные типы преобразователей. Все они обладают одним общим признаком – управляют потоком энергии посредством включения и выключения полупроводниковых электронных элементов, введенных в основные электрические схемы, или благодаря циклической передаче тока от одного такого элемента к другому (процесс, называемый коммутацией). Наиболее часто преобразователи классифицируют в зависимости от вида коммутации. Обычно различают преобразователи с естественной и принудительной коммутацией. В преобразователях с естественной коммутацией циклическая коммутация диодов происходит под действием переменного напряжения источника питания или сети. Принудительная коммутация в преобразователях осуществляется с помощью дополнительных коммутирующих контуров (см. подразд. 10.7).
По своему назначению преобразователи подразделяются:
• на преобразователи с естественной коммутацией, связывающие цепь переменного тока с цепью постоянного тока или наоборот. Эти преобразователи обеспечивают передачу энергии в обоих направлениях. В зависимости от направления потока энергии различают выпрямительный и инверторный режимы их работы;
• преобразователи с принудительной коммутацией, связывающие цепь постоянного тока с цепью переменного тока. Эти преобразователи также обеспечивают передачу энергии в обоих направлениях, но, как правило, они используются в инверторном режиме;
• преобразователи с принудительной коммутацией, разделяющие две цепи постоянного тока, называемые также прерывателями постоянного тока;
• преобразователи с естественной или принудительной коммутацией, разделяющие две цепи переменного тока одной и той же частоты, называемые также прерывателями переменного тока;
• преобразователи с естественной или принудительной коммутацией, связывающие цепи переменного тока разных частот, называемые обычно преобразователями частоты;
• специальные преобразователи, представляющие собой комбинации преобразователей, перечисленных выше (преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и т.п.). Неотъемлемой частью преобразовательных устройств являются различные схемы управления, регулирования и защиты. Условия работы преобразователей регламентируются ГОСТ 4.139 – 85 и 25953 – 83, по которым устройства должны работать при температурах окружающей среды от -70 до +50°С, в условиях сильного загрязнения воздуха пылью, парами масла и топлива, а также высокой влажности воздуха. Поскольку локомотив может работать на подъездных путях промышленных предприятий, то преобразователи должны устойчиво функционировать в условиях агрессивных сред. Механические воздействия на оборудование подвижного состава, достигающие 3g, могут значительно увеличиваться как по частоте, так и по амплитуде, при неисправностях механической части локомотива или пути.

## 10.2. Выпрямители.

Выпрямители однофазного тока. Применяются для питания выпрямленным напряжением различных систем и устройств промышленной и транспортной автоматики, обработки и отображения информации, бытовых приборов. Как правило, выпрямители однофазного тока рассчитаны на небольшие мощности (до нескольких киловатт). В тяговом электроприводе на электроподвижном составе (электровозах и мотор-вагонах электропоездов), получающим питание от контактной сети однофазного тока, применяются мощные однофазные выпрямители мощностью от нескольких сотен киловатт до нескольких мегаватт. Простейшей схемой однофазного выпрямителя является *однопульсовая* (*однополупериодная*) схема, выполненная на диоде VD1 с шунтирующим диодом VD2 или без него (рис. 10.1, *а*). В практических схемах такой выпрямитель используется крайне редко из-за низкого качества выпрямленного напряжения $U_d$: оно получается пульсирующим и состоит из отдельных полусинусоидальных импульсов, которые повторяются через каждый период (рис. 10.1, *в*). Такая форма выпрямленного напряжения получается из-за того, что диод VD1 проводит только одну полуволну напряжения $U_2$, а вторая им отсекается. Значение выпрямленного напряжения $U_d$ на нагрузке $R_н$ принимают равным среднему значению $U_{ср}$ пульсирующего напряжения. Пренебрегая падением напряжения на вторичной обмотке трансформатора, получим: $U_d = U_{ср} = (1 / \pi)\, U_2 = 0{,}318U_2$ (10.1)

где $U_2$ – эффективное напряжение вторичной обмотки трансформатора, В. Двухпульсовые (двухполупериодные) однофазные выпрямители применяют для уменьшения пульсации выпрямленного тока и улучшения использования трансформатора и диодов. Обычно применяют схемы с нулевым выводом или мостовые схемы. В выпрямителе с нулевым выводом (рис. 10.2, *а*) вторичная (вентильная) обмотка трансформатора имеет три вывода. К двум крайним выводам подключены диоды VD1 и VD2. Потребитель ($R_н$,$L_н$) включен между точкой соединения их катодов и средним выводом вторичной обмотки трансформатора. Трансформатор преобразует однофазное напряжение, подаваемое на его первичную обмотку, в двухфазное. При этом индуцируемые в его обмотках ЭДС сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180 эл. град.

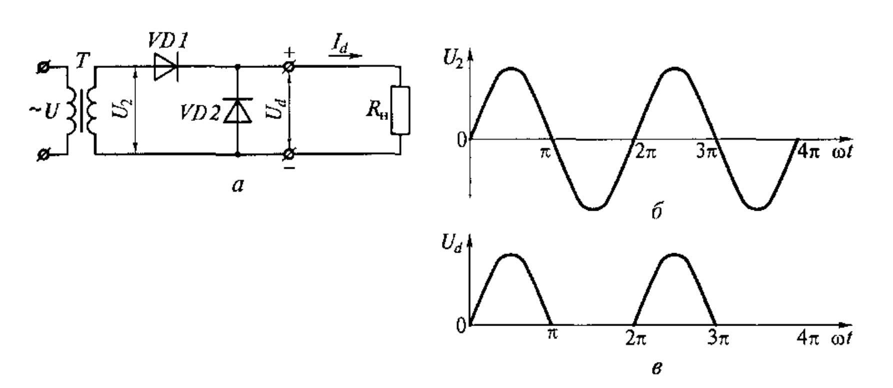



Рис. 10.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель.
*а* – принципиальная схема; *б* и *в* – графики входного и выпрямленного напряжения соответственно; *T*– трансформатор; $I_d$ – выпрямленный ток.

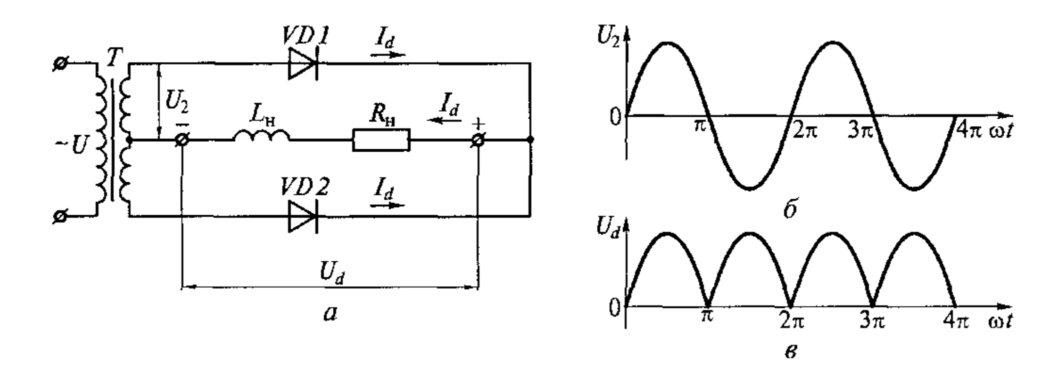



Рис. 10.2. Двухполупериодный однофазный выпрямитель на основе трансформатора с выводом от средней точки.
*а* – схема выпрямителя, *б* и *в* – графики входного и выпрямленного напряжения соответственно.

Так как оба вентиля включены в две противоположные фазы вторичной обмотки трансформатора, то они проводят ток поочередно по аналогии с предыдущим случаем: положительную полуволну пропускает диод VD1, а отрицательную – VD2. Определим основные расчетные соотношения, воспользовавшись временными диаграммами на рис. 10.2, *б* и *в*. Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_d = 2\sqrt{2}U_2/\pi = 0{,}9U_2 \quad (10.2)$$

Максимальное значение обратного напряжения на диодах:

$$U_{bmax} = 2U_{2max} = \pi U_d \quad (10.3)$$

где $U_{2max}$ – амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора, В. Эффективное значение тока вторичной обмотки трансформатора составляет $I_2 = 0{,}785I_d$. Расчетная (типовая) мощность, Вт, преобразовательного трансформатора $S_T$ определяется величиной мощности нагрузки $P_d$: $S_T = = 1{,}48P_d$

Мостовой выпрямитель (рис. 10.3) состоит из четырех диодов VD1– VD4, подключенных непосредственно к сети или ко вторичной обмотке трансформатора, который в этом случае не имеет среднего вывода. В течение положительного полупериода ток $I_d$ проходит от источника переменного тока через диод VD1, нагрузку $R_н$ и диод VD4 ко второму выводу. В течение следующего, отрицательного, полупериода ток $I_d$ проходит от источника через диод VD3, нагрузку $R_н$ и диод VD2 к первому выводу. В оба полупериода ток проходит через нагрузку $R_н$ в одном направлении. Среднее значение выпрямленного напряжения $U_d = 0{,}9U_2$.

Максимальное значение обратного напряжения на диодах:

$$U_{bmax} = 1{,}57U_d \quad (10.4)$$

Эффективное значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_2 = 1{,}11I_d \quad (10.5)$$

Расчетная мощность обмоток трансформатора:

$$S_т = 1{,}23P_d \quad (10.6)$$

Коэффициент использования трансформатора по мощности: $k_P = 0{,}815P_d$

Качество выпрямленного напряжения в обоих случаях оценивается коэффициентом пульсации $k_q$, представляющим собой отношение амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения к его среднему значению. Поскольку $k_q = 0{,}66$, то можно сделать вывод, что качество выпрямленного напряжения невысокое. Для обеспечения удовлетворительной работы потребителей в большинстве случаев необходим сглаживающий фильтр, улучшающий качество преобразования тока.

**Выпрямители трехфазного тока.** Принципы построения и режимы работы трехфазных выпрямителей аналогичны однофазным выпрямителям. Поэтому при анализе схем трехфазных выпрямителей используются аналогичные методы. Особенностью трехфазных выпрямителей является значительно меньшая переменная составляющая выпрямленного напряжения. В связи с этим в неуправляемых трехфазных выпрямителях даже при чисто активной нагрузке ток нагрузки является непрерывным и допущение о полностью

сглаженном токе более близко к реальным режимам работы. Это допущение, наряду с другими упрощениями, принятыми при анализе однофазных выпрямителей, будет неоднократно использовано и здесь. В *трехфазной (трехпульсовой)* схеме используется источник напряжения, обмотки которого соединены в звезду с нулевым выводом (рис. 10.4, *а*). Диоды VD1– VD3 включают в цепь каждой фазы напряжения, а нагрузку – между точкой, соединяющей катоды диодов, и нулевой точкой 0 источника.

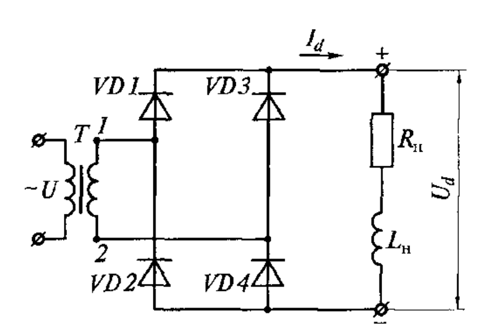



Рис. 10.3. Схема мостового выпрямителя.

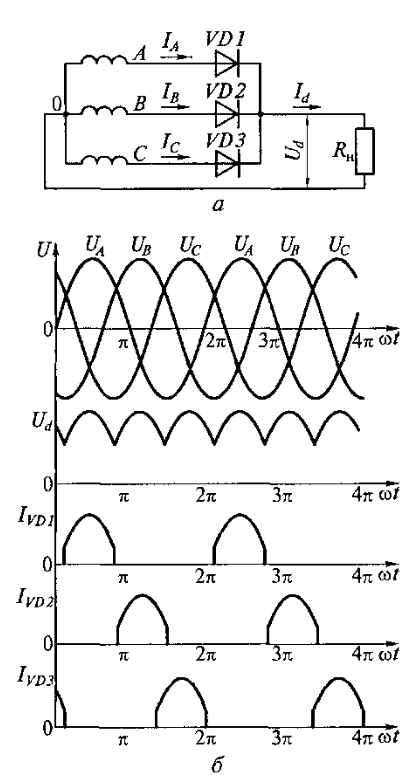



Рис. 10.4. Трехфазный выпрямитель.

*а* – схема с нулевым выводом; *б* – графики изменения токов и напряжений источника.

Фазы работают поочередно. Ток нагрузки $I_d$ проходит только через тот диод, анод которого в данный момент имеет наиболее высокий положительный потенциал (рис. 10.4, *б*). При изменении потенциалов на анодах диодов ток соответственно переключается с одного диода на другой. Каждый из диодов в течение одного периода проводит ток на интервале 2π/3 =120 эл. град. Среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке $R_н$ составляет:

$$U_d = 1{,}17U_{2ф} \quad (10.7)$$

где $U_{2ф}$ ⁻ эффективное значение фазного напряжения на холостом ходу, В. Средний ток, протекающий через диод, $I_{ср} = 0{,}33I_d$. Максимальное обратное напряжение $U_{bmax}$, приложенное к диоду VD1, определяется как разность потенциалов анода диода VD1 и катодов диодов VD2n VD3. Подобным образом определяется максимальное обратное напряжение на других диодах: $U_{bmax} = 2{,}09U_d$ (10.8)

Эффективное значение тока в обмотках источника напряжения:

$$I_A + I_B + I_c = I_d / \sqrt{3} = 0{,}58I_d \quad (10.9)$$

В случае использования трансформатора коэффициент использования его мощности $k_p$ = 0,74, и коэффициент пульсации выпрямленного напряжения $k_q$ = 0,25. Как видим, степень использования трансформатора здесь выше, чем в однофазных выпрямителях, но все же достаточно низка. Кривые токов вторичных обмоток содержат постоянную составляющую $I_d/3$. Лучшие результаты дает применение трехфазных шестипульсовых выпрямителей.

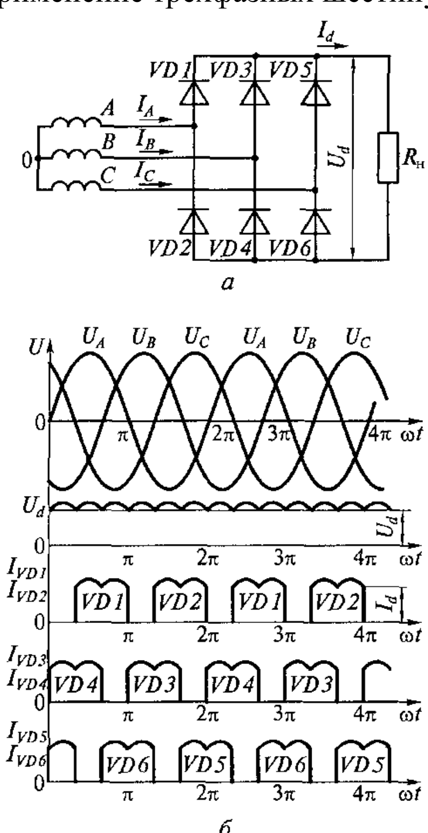



Рис. 10.5. Мостовой шестипульсовый выпрямитель.
*а* – схема; *б* – графики изменения токов и напряжений.

*Мостовая шестипульсовая* схема выпрямителя, или схема Ларионова, состоит из трехфазного источника напряжения, фазные обмотки которого соединяются в звезду или треугольник, и двух групп диодов: катодной VD1, VD3, VD5 и анодной VD2, VD4, VD6 (рис. 10.5, *а*). Диоды групп образуют трехфазный мост. Положительным полюсом является общая точка диодов VD1, VD3, VD5, а отрицательным – общая точка диодов VD2, VD4, VD6. Рассмотрим вариант схемы соединения фазных обмоток в звезду. В мостовой шестипульсовой схеме выпрямителя ток одновременно проводят два диода. Первый – это тот из диодов VD1, VD3, VD5, положительный потенциал анода которого максимален, второй – из диодов VD2, VD4, VD6, потенциал которого минимален. В результате на выходе формируется выпрямленное напряжение $U_d$. Коммутация диодов происходит через каждую шестую часть периода, и выпрямленное напряжение $U_d$ имеет шесть пульсаций за один период питающего напряжения (рис. 10.5, б). Ток диода имеет форму, близкую к прямоугольной, со средней высотой прямоугольника $I_d$ и длительностью $2\pi/3$ =120 эл. град. Обратное напряжение на диодах формируется линейными напряжениями. Среднее значение выпрямленного напряжения: $U_b = 1{,}35U_{2л}$ (10.10)

где $U_{2л}$ – эффективное значение линейного напряжения, В. Средний ток через каждый диод $I_{ср} = 0{,}33I_d$, а максимальное обратное напряжение на диодах составляет:

$$U_{bmax} = 1{,}05U_d \quad (10.11)$$

В схеме эффективно используются диоды и трансформатор, в сердечниках которого

отсутствует вынужденное подмагничивание. Качество выпрямленного напряжения в схеме высокое: коэффициент использования трансформатора $k_р$ = 0,95, а коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $k_q$ = 0,057. Все это обусловило широкое применение мостовых трехфазных выпрямителей. При соединении обмоток источника напряжения в треугольник линейные токи сохраняют предыдущую форму, а токи в фазных обмотках являются результатом распределения тока $I_d$ по двум параллельным ветвям на каждом интервале. В каждый момент ток проводят два диода – один в анодной, другой в катодной группах, а конкретно те диоды, к которым приложено максимальное (по модулю) линейное напряжение. В такой схеме выпрямленное напряжение формируется из участков максимума и минимума линейных значений напряжения питания.

*Двенадцатипульсовые схемы* выпрямления обеспечивают меньший уровень пульсаций и высших гармонических составляющих в кривой сетевого тока. Кроме того, они позволяют создать агрегат на более высокие напряжения и токи. Двенадцатипульсовые схемы разделяются на эквивалентные и собственные.

*Собственные схемы* строятся на основе последовательного соединения двух шестипульсовых схем выпрямления, каждая из которых питается от своего трансформатора или другого источника трехфазного тока. Обмотки источника напряжения соединяются так, чтобы их линейные напряжения были сдвинуты относительно друг друга на 30 эл. град. Для этого одну из вторичных обмоток соединяют в звезду, а вторую – в треугольник. При этом в последнем случае фазное напряжение будет √3в раз больше, чем у первой. Результирующее выпрямленное напряжение получается двенадцатипульсовым благодаря суммированию двух шестипульсовых: $U_d = U_{dl} + U_{d2}$

*Эквивалентные схемы* (рис. 10.6) строятся на основе параллельного соединения шестипульсовых выпрямителей. Они нашли широкое применение в выпрямительных устройствах тепловозов с электрической передачей переменно-постоянного тока. Использование таких схем позволяет получить меньшие пульсации выпрямленного напряжения ($k_q$ = 0,03), а следовательно, улучшить условия работы тяговых двигателей без установки дополнительных сглаживающих устройств и повысить коэффициент мощности благодаря приближению формы потребляемого тока к синусоидальной. Средние значения выпрямленного напряжения одинаковы и равны общему выпрямленному напряжению $U_{d1} = U_{d2} = U_d$. Общий ток нагрузки $I_d$ распределяется поровну между обеими трехфазными обмотками. Основные расчетные зависимости для каждой из выпрямительных схем остаются такими же, как для шестипульсовых схем выпрямления.

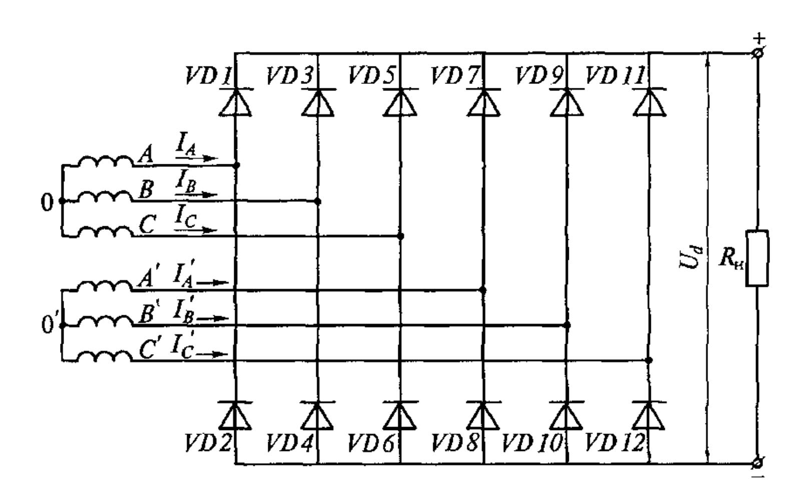



Рис. 10.6. Эквивалентная двенадцатипульсовая схема выпрямителя.

Внешняя характеристика выпрямителя представляет собой зависимость среднего выпрямленного напряжения от среднего выпрямленного тока $U_d = f(I_d)$ и отражает все режимы работы: от холостого хода до короткого замыкания (рис. 10.7). Как видно из

графика, с увеличением тока нагрузки выпрямленное напряжение снижается. Это объясняется несколькими причинами, которые условно можно разделить на три группы.

1. Падение напряжения $U_{d\gamma}$ вызванное процессом коммутации и обусловленное индуктивностью источника напряжения. Оно может быть названо индуктивным падением напряжения ($\Delta U_{dL} = \Delta U_{d\gamma}$).

2. Падение напряжения на активных сопротивлениях схемы – активные падения напряжения $\Delta U_{dR}$.

3. Падение напряжения на силовых полупроводниковых приборах выпрямителя $\Delta U_{d\gamma}$ = n$\Delta U_{V}$, где n – число последовательно включенных диодов (при мостовой схеме – суммарное число последовательно соединенных диодов в двух противоположных плечах моста); $\Delta U_{V}$ – падение напряжения на одном диоде ($\Delta U_{V}$ = = 0,4...1,4В). В общем случае среднее выпрямленное напряжение схемы: $U_{d} = U_{d0} - \Delta U_{d\gamma} - \Delta U_{dR} - \Delta U_{V}$, где $U_{d0}$ – среднее выпрямленное напряжение холостого хода, В. Таким образом, уменьшение выпрямленного напряжения связано с возрастанием падений напряжений $\Delta U_{dR}$ и $\Delta U_{d\gamma}$. Коэффициент полезного действия выпрямителя определяется формулой: $\eta = P_{нагр} / P_{нагр} + \Delta P$, где $P_{нагр}$ – мощность, потребляемая нагрузкой, Вт; $\Delta P$ – внутренние потери мощности в выпрямителе, Вт. В величину $\Delta P$ входят не только потери мощности в диодах, но и в обмотках источника напряжения, сглаживающем реакторе, а также мощность, расходуемая во вспомогательных устройствах (например, вентиляторах, осуществляющих охлаждение диодов). Общий КПД выпрямителя можно представить в виде произведения: $\eta = \eta_{V}\eta_{T}$, где $\eta_{V}$ – КПД диодов; $\eta_{T}$ – КПД источника напряжения. КПД диодов выпрямителя определяется по формуле:

$$\eta_{V} = U_{d} / U_{d} + \Delta U_{V}$$

Из этой формулы следует, что КПД диодов существенно возрастает по мере увеличения рабочего напряжения $U_{d}$ выпрямителя. При этом, чем выше класс применяемых диодов, тем больше $\eta_{V}$. При небольших напряжениях КПД выпрямителя определяется в основном КПД диодов. При переходе же к более высоким напряжениям возрастает влияние источника напряжения и вспомогательных устройств, так как КПД диодов приближается к единице. Например, КПД выпрямительной установки тепловоза 2ТЭ116 достигает 0,98.

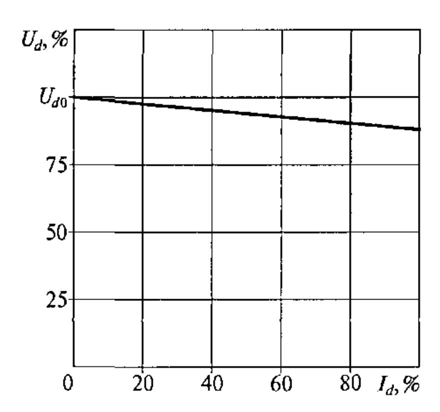



Рис. 10.7. Внешняя характеристика двенадцатипульсового выпрямителя.
$U_{d0}$ – среднее выпрямленное напряжение на холостом ходу.
$U_{d} = f(I_{d})$

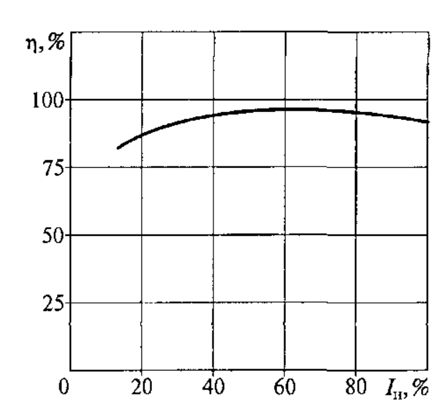



Рис. 10.8. Зависимость КПД двенадцатипульсового выпрямителя от тока нагрузки. $\eta = f(I_d)$

Большая экономичность полупроводниковых выпрямителей при высоких напряжениях обусловливается также и тем, что они сохраняют высокие значения КПД при изменении нагрузки в широких пределах. Зависимость КПД выпрямительной установки от тока нагрузки $I_н$ показана на рис. 10.8.

## 10.3. Управляемые выпрямители.

Управляемые выпрямители однофазного напряжения. В системах регулирования тока обмотки возбуждения тяговых генераторов тепловозов 2ТЭ116, ТЭП70 и ТЭМ7 нашли широкое распространение управляемые выпрямители однофазного напряжения, построенные на управляемых полупроводниковых приборах – тиристорах (силовых транзисторах). Тиристор открывается, если:

1. замкнута цепь нагрузки и анод (коллектор) имеет более высокий потенциал, чем катод (эмиттер);
2. на управляющий электрод (базу) подан импульс напряжения положительной полярности необходимой величины и длительности относительно катода (эмиттера). Открывание тиристоров в однофазных и многофазных управляемых схемах выпрямления или преобразования происходит в строго определенные моменты времени. Изменение фазы переднего фронта управляющего импульса относительно переменного анодного напряжения можно осуществить плавное регулирование выходного напряжения преобразователей. С помощью управляемых тиристорных или тиристорно-диодных выпрямителей решаются задачи плавного регулирования среднего значения выпрямленного напряжения (рис. 10.9). На управляющие выводы тиристоров VS1 и VS2 подаются отпирающие импульсы, вырабатываемые системой автоматического регулирования. С помощью этих импульсов можно открывать тиристоры в заданные моменты времени и изменять общее время, в течение которого каждый тиристор проводит ток. Промежуток времени между моментом подачи положительного напряжения на анод тиристора VS1 или VS2 и моментом подачи отпирающего импульса $I_у$ на их управляющие электроды называется углом управления а. С увеличением угла управления α уменьшается площадь, ограниченная кривой выпрямленного напряжения, и уменьшается его среднее значение $U_{ср}$. Наибольшее значение выпрямленное напряжение будет иметь при α = 0 (аналог неуправляемого выпрямителя), а при α = 180 эл. град, оно будет равно нулю. Тиристоры VS1 и VS2 проводят ток поочередно: каждый во время той части периода, когда напряжение на его аноде положительно. Например, если на аноде тиристора VS1 положительный потенциал и на его управляющий электрод подать сигнал управления, то VS1 откроется. Возникнут условия для протекания тока от источника напряжения через тиристор VS1, нагрузку $R_н$ диод VD2 ко второму выводу источника напряжения. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не сменится полярность питающего напряжения. После чего создаются условия для включения в работу тиристора VS2, который откроется после подачи сигнала управления, и ток будет протекать через него,

нагрузку $R_н$, диод VD1 к источнику напряжения. Для получения симметричной формы выпрямленного напряжения должно соблюдаться с достаточной точностью равенство углов управления a обоих плеч выпрямителя. Асимметрия углов управления a приводит к неравномерной загрузке тиристоров VS1, VS2, и диодов VD1, VD2, увеличению пульсаций и появлению в выпрямленном напряжении трудно сглаживаемой низкочастотной составляющей. Кроме того, уменьшается КПД выпрямителя и сужается диапазон регулирования напряжения. Среднее значение выпрямленного напряжения без учета потерь в коммутационный период зависит не только от a, но и от характера нагрузки. При чисто активной нагрузке кривая выпрямленного тока повторяет кривую напряжения:

$$U_{dα} = (2\sqrt{2} / π)U_2(1 + \cos α) = 0{,}45U_2(1 + \cos α) \quad (10.12)$$

где $U_2$ – действующее значение напряжения источника, В.

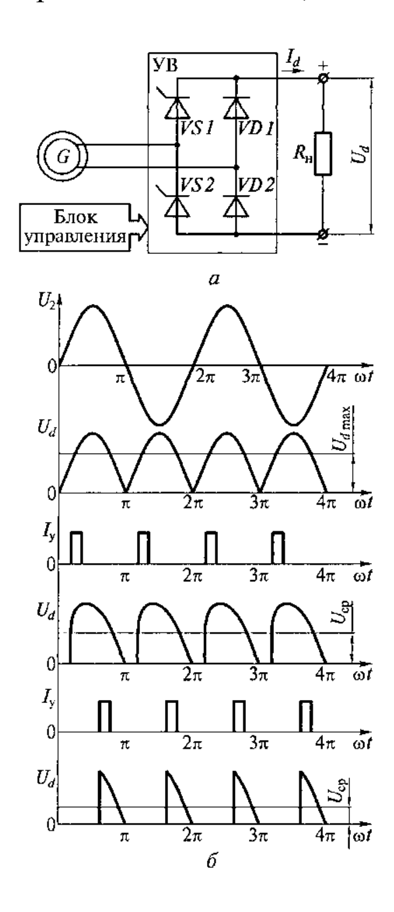



Рис. 10.9. Схема управляемого выпрямителя однофазного тока (*а*) и графики изменения напряжений и токов (*б*). УВ – управляемый выпрямитель.

Среднее значение тока нагрузки при α ≠ 0:

$$I_{dα} = I_{dн} \sqrt{π - α / π} \quad (10.13)$$

где $I_{dα}$ – среднее значение тока нагрузки при α = 0, А. Анализ кривых тока дает возможность определить средний ток тиристоров VS1, VS2 и диодов VDh VD2:

$$I_т = (π - α / 2π)I_{dн} \quad (10.14)$$

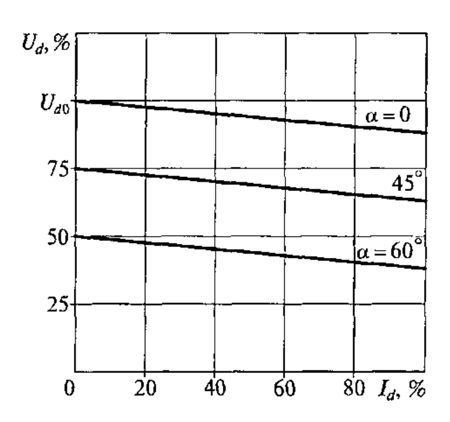



Рис. 10.10. Семейство внешних характеристик управляемого выпрямителя $U_d = f(I_d)$

Увеличение тока нагрузки вызывает снижение среднего значения выпрямленного напряжения из-за тех же потерь, что и в неуправляемом выпрямителе. На рис. 10.10 представлено семейство внешних характеристик управляемого выпрямителя при различных углах управления α. При регулировании выпрямленного напряжения изменением угла управления α, момент коммутации тока с одного тиристора на другой сдвигается по сравнению с неуправляемым выпрямителем на угол α. Одним из важных энергетических показателей выпрямительных установок является коэффициент мощности на входе выпрямителя, который определяет эффективность использования электрической энергии источника напряжения. Коэффициент мощности $k_p$ для электрических цепей, напряжения и токи которых несинусоидальны, может быть определен как отношение активной мощности $P$ к полной мощности $S$. После соответствующих преобразований получим:

$$k_p = 1 + \cos\alpha / \sqrt{\pi} \quad (10.15)$$

Анализируя полученную зависимость, можно видеть, что при регулировании выпрямленного напряжения путем изменения угла управления тиристоров α, коэффициент мощности $k_p$ снижается при увеличении α. Это свидетельствует о возрастании амплитуды высших гармонических составляющих тока и снижении КПД выпрямителя. В связи с этим данные устройства используются, как правило, в качестве маломощных источников регулируемого напряжения.

**Однополупериодные управляемые выпрямители трехфазного напряжения**. На тепловозах ТЭ109, 2ТЭ116УП, 2ТЭ121 устанавливают тяговый агрегат, содержащий тяговый генератор и отопительный генератор. Последний предназначен для питания системы электроснабжения поезда и приводов вспомогательных агрегатов тепловоза. Независимое возбуждение этих генераторов выполнено по системе трехфазная обмотка – управляемый выпрямитель. Формирование тока возбуждения в таких системах осуществляется при помощи двух независимых однополупериодных управляемых (полууправляемых) выпрямителей трехфазного напряжения, схема одного из которых приведена на рис. 10.11, *а*. Для открытия одного из тиристоров VS1, VS2 или VS3 необходимо соблюсти два условия: во-первых, на аноде тиристора должен быть положительный потенциал, а во-вторых, на его управляющий электрод должен быть подан сигнал управления. Предположим, что эти условия выполнены для тиристора VS1. После его открытия ток от источника напряжения через тиристор VS1 и нагрузку $R_н$ потечет к нулевой точке. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет смена полярности напряжения данной фазы или не будет открыт тиристор другой фазы, анод которого имеет более высокий потенциал по сравнению с VS1. Для удобства анализа процессов, происходящих в данной схеме, будем считать, что на выходе источника напряжения сформирована трехфазная система синусоидальных напряжений (рис. 10.11, *б*), тиристоры – идеальные ключи, активное сопротивление обмоток источника напряжения равно нулю. При этом для выпрямителей относительно небольшой мощности (мощность, потребляемая обмоткой возбуждения,

составляет 3...5% мощности тягового генератора) можно считать, что и индуктивное сопротивление обмотки возбуждения тягового генератора равно нулю. Полный диапазон изменения угла регулирования тиристоров в данном выпрямителе составляет 180 эл. град. Как и в однофазном диодно-тиристорном выпрямителе, в рассматриваемом выпрямителе тиристоры включаются по сигналу от системы управления. Среднее значение выпрямленного напряжения установки можно определить на основании следующего соотношения: $U_{ср}= 1{,}17U_2(1 + \cos\alpha)$ (10.16)

Средние значения токов, протекающих через тиристоры, могут быть определены по формуле: $I_{тср} = (1 / 2\pi)[(2\pi / 3)I_d] = I_d / 3$ (10.17)

Максимальное значение обратного напряжения, приложенного к тиристорам, составляет:

$$U_{тобр} = \sqrt{6}U_2 = (\pi/3)U_d = 1{,}05U_d \quad (10.18)$$

**Мостовой управляемый выпрямитель.** Для плавного регулирования напряжения, приложенного к тяговому электродвигателю, может использоваться мостовой управляемый выпрямитель трехфазного напряжения (рис. 10.12). Схема выпрямителя выполнена на тиристорах VS1– VS6. В отличие от полууправляемого выпрямителя в данной схеме все процессы симметричны и его характеристики более благоприятны в широком диапазоне регулирования.

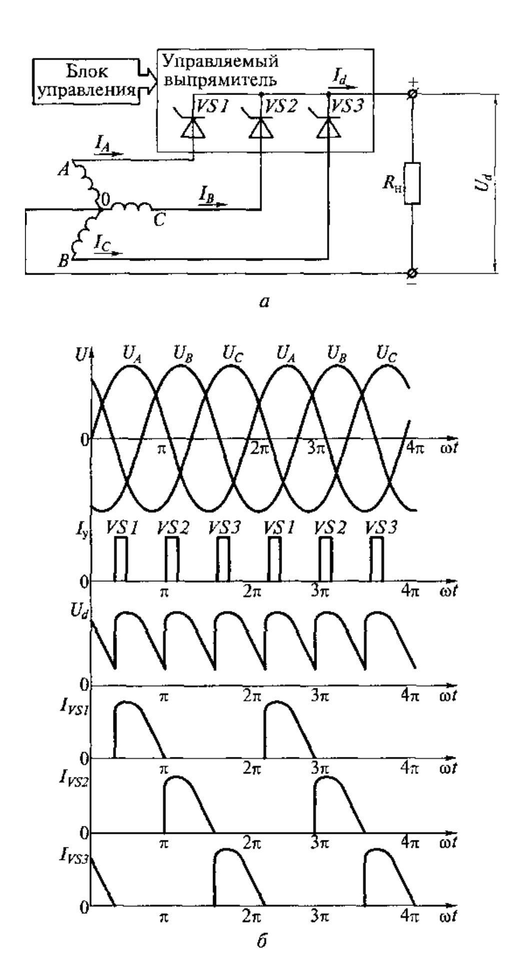



Рис. 10.11. Схема трехфазного управляемого выпрямителя (*а*) и графики изменения напряжений и токов (*б*)

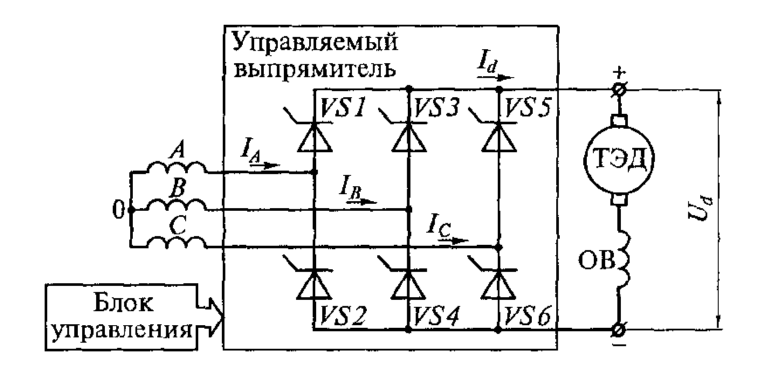



Рис. 10.12. Схема мостового управляемого выпрямителя (УВ).
ТЭД – тяговый электродвигатель

На тиристоры от блока управления подаются сдвоенные (с интервалом в $\pi/3 = 60$ эл. град.) импульсы управления или пакеты импульсов длительностью более $\pi/3$. Такой алгоритм следования импульсов необходим для одновременного отпирания одного тиристора в катодной группе и одного тиристора в анодной, чтобы образовалась цепь нагрузки (в данном случае тяговый электродвигатель) при включении выпрямителя и в режиме прерывистого тока при глубоком регулировании. Открытие одного из тиристоров катодной группы VS1, VS3, VS5 (например, VS1) произойдет при наличии на аноде положительного потенциала и подаче на него импульса управления. Открытие одного из тиристоров анодной группы VS2, VS4, VS6 (например, VS6) произойдет при наличии на катоде отрицательного потенциала и подаче на него импульса управления. После этого создается цепь от фазы А источника напряжения через тиристор VS1, тяговый электродвигатель, тиристор VS6 к фазе С источника напряжения. Коммутация в этой схеме происходит при смене полярности приложенного к тиристорам напряжения либо при открытии пары тиристоров с более высокими положительными и отрицательным потенциалами соответственно.
Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{dср} = U_{d0} - \Delta U_{d\alpha} - \Delta U_{d\gamma} \quad (10.19)$$

где $\Delta U_{d\alpha}$ - $1{,}17U_2(1 - \cos\alpha)$ – потери, обусловленные отклонением формы выпрямленного напряжения от синусоидального, В; $\Delta U_{d\gamma}$ - $1{,}17U_2[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)]$ – потери, обусловленные коммумутацией тиристоров, В; $\gamma = \arccos(1 - (2I_d x_L / \sqrt{6}U_2))$ угол коммутации, эл. град.; $x_L$ – индуктивное сопротивление нагрузки, Ом. Подставив значения составляющих в выражение (10.19), получим уравнение внешней характеристики выпрямителя:

$$U_{dср} = U_{d0}\cos\alpha - (3I_d x_L / \pi) \quad (10.20)$$

При изменении угла управления с пределах $0 < \alpha < 60$ эл. град, напряжение и ток выпрямителя непрерывны даже при активной нагрузке. Для этого поддиапазона среднее значение выпрямленного напряжения составляет:

$$U_{срI} = U_{d0}\cos\alpha \quad (10.21)$$

При изменении угла управления в пределах $60 \leq \alpha \leq 120$ эл. град, кривая выпрямленного напряжения $U_d$ при активной нагрузке становится прерывистой и среднее значение выпрямленного напряжения можно определить как:

$$U_{срII} = 1{,}17U_2[1 + \cos(\pi / 3 + \alpha)] \quad (10.22)$$

Предельным углом управления, при котором $U_d = 0$, в случае активной нагрузки является $\alpha_{max} = 120$ эл. град. Управляемые выпрямители выполняют также функцию бесконтактного аппарата, обеспечивающего отключение цепи нагрузки от сети в случае аварийного нарастания тока путем прекращения подачи импульсов управления на тиристоры.

### 10.4. Инверторы.

Преобразователь с тиристорами может работать в выпрямительном и *инверторном* режимах. Как уже отмечалось, выпрямительным режимом называют такой режим, когда электрическая

мощность передается из цепи переменного тока в цепь постоянного тока. При инверторном режиме, наоборот, мощность передается из цепи постоянного тока в цепь переменного тока.
На железных дорогах используются два вида инверторов:
1) *автономные инверторы* для построения электрической передачи мощности локомотивов с приводов переменного тока;
2) неавтономные инверторы, или ведомые сетью, для преобразования энергии при рекуперативном торможении электровоза или при реостатных испытаниях тепловозов.
*Автономные инверторы* – это преобразователи постоянного тока в переменный однофазный или многофазный ток, коммутация тока в которых осуществляется независимо от процессов во внешних электрических цепях. Независимая коммутация обеспечивается дополнительными коммутирующими устройствами внутри самого преобразователя. На выходе такого преобразователя можно получать переменный ток теоретически любой частоты и напряжения и плавно регулировать его от нуля до максимального значения. Благодаря этому свойству автономные инверторы находят все более широкое применение в регулируемых электроприводах с асинхронными электродвигателями. Процессы переключения тока в автономных инверторах зависят от способа принудительной коммутации тока, особенностей электрической схемы, параметров источника питания и нагрузки. Полная коммутация с переключением тока из одной ветви схемы в другую в автономных инверторах происходит за несколько этапов, важнейшими из которых являются:
- уменьшение прямого тока в одном из тиристоров до нуля;
- задержка подачи прямого напряжения на этот тиристор до полного восстановления его запирающей способности;
- нарастание прямого тока во втором тиристоре.
Эти события могут наступать одновременно или последовательно. Создание средств для осуществления надежной коммутации обычно является одной из наиболее трудных проблем при проектировании автономных инверторов. Принципиально эти средства можно разделить на два класса. К первому классу можно отнести обычные, не полностью управляемые тиристоры, дополненные специальными узлами принудительной коммутации, например, в виде предварительно заряженных конденсаторов и вспомогательных тиристоров. Второй класс составляют запираемые тиристоры и силовые транзисторы, которые закрываются специальными импульсами управления. *Инверторы, ведомые сетью*, используются для передачи избыточной энергии потребителей в сеть переменного тока частотой 50 Гц, в частности, при рекуперативном торможении электровозов и электропоездов. Ведомые инверторы выполняются по тем же схемам, что и управляемые выпрямители. Управление режимом работы инвертора должно быть таким, чтобы обеспечивалась коммутация тиристоров под действием сети. Необходимым условием работы инвертора является подача на его вход напряжения постоянного тока. Из всего многообразия инверторов можно выделить две большие группы: автономные инверторы напряжения и автономные инверторы тока.
**Однофазный автономный инвертор напряжения**. Эта схема содержит мост главных тиристоров VS1– VS4, встречно включенный мост обратных диодов VD1– VD4, блок управления тиристорами, входной конденсатор фильтра Q, активно-индуктивную нагрузку $L_н R_н$ и коммутирующий конденсатор $C_к$ (рис. 10.13, *а*).

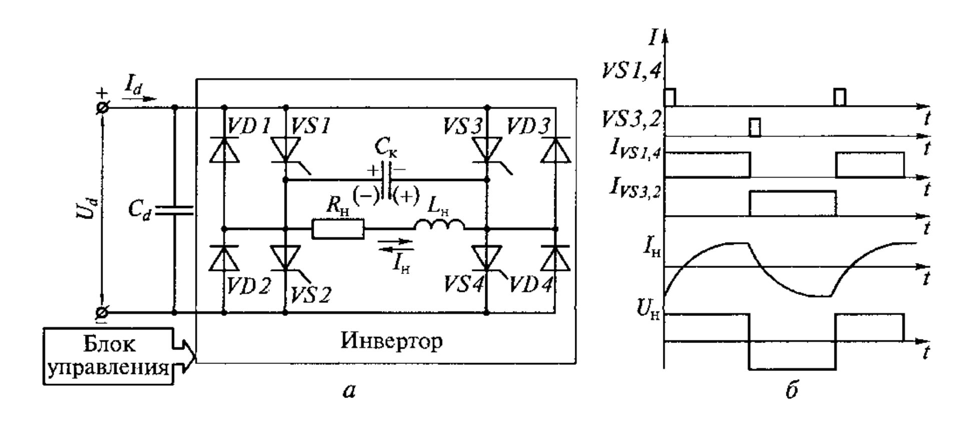



Рис. 10.13. Схема однофазного инвертора напряжения (*а*)
и графики изменения напряжений и токов (*б*).

Тиристоры попарно и поочередно отпираются по цепи управления, подключая цепь нагрузки к источнику напряжения. Такой алгоритм переключения обеспечивает формирование в нагрузке напряжения прямоугольной формы. Предположим, что открыты тиристоры VS1, VS4. Тогда ток от источника напряжения $U_d$ через открытый тиристор VS1, нагрузку $L_нR_н$ и открытый тиристор VS4 протекает ко второму выводу источника напряжения. Параллельно нагрузке подключен коммутирующий конденсатор $C_к$, который в этот период заряжается от источника $U_d$ (полярность заряда конденсатора показана без скобок). Это состояние продолжается до момента открытия тиристоров VS3 и VS2. Если открыть тиристоры VS3 и VS2, то в первый момент времени тиристоры VS1 и VS4 остаются открытыми. Этим создается цепь разряда конденсатора $C_к$ по двум цепям: во-первых, от положительно заряженной обкладки (от плюса) $C_к$ через открытые тиристоры VS1 и VS3 на отрицательно заряженную обкладку (на Минус) $C_к$, а, во-вторых, от плюса $C_к$ через открытые тиристоры VS2 и VS4 на минус $C_к$. Для тиристоров VS1 и VS4 ток разряда конденсатора $C_к$ является обратным, который приводит к уменьшению тока этих тиристоров ниже тока удержания, и они закрываются. Окончательный разряд конденсатора $C_к$ происходит через диод VD1 и тиристор VS3, а также через тиристор VS2 и диод VD4. Наступает новый цикл работы инвертора. Ток нагрузки $I_н$ протекает в обратном направлении, и заряд конденсатора $C_к$ имеет противоположную полярность (полярность заряда показана в скобках). Это состояние продолжается до момента открытия тиристоров VS1 и VS4. Временные диаграммы работы однофазного инвертора напряжения представлены на рис. 10.13, *б*. В момент очередного запирания тиристоров энергия, запасенная в $L_н$, поступает в источник питания через обратные диоды, а конденсатор фильтра $C_d$ исключает уменьшение напряжения питания в моменты коммутации тиристоров. Изменением момента запирания одного из тиристоров в каждой работающей паре можно менять длительность и частоту подачи напряжения источника питания на нагрузку. Эффективное значение напряжения первой гармонической составляющей на нагрузке: $U_{н1} = (2\sqrt{2} / \pi)U_d = 0{,}9U_d$ (10.23)

Величина тока нагрузки: $I_н = U_d / R_н - (U_d / R_н + I_{н0})\exp((- R_н / x_L)\omega t)$ (10.24)

где $I_{н0}$ – ток нагрузки в момент коммутации, А.

**Трехфазный мостовой инвертор напряжения.** Схема этого инвертора содержит шесть тиристорных ключей VS1–VS6, образующих мост, шесть встречно включенных диодов VD1–VD6, соединенных также по схеме трехфазного моста, и блок управления. Диоды выполняют функции диодов обратного тока, а блок управления обеспечивает переключение тиристорных ключей по заданному алгоритму управления продолжительностью проводящего состояния тиристоров (рис. 10.14). Частота выходного напряжения задается блоком управления посредством изменения цикла переключения тиристорных ключей. Устройства для коммутации тиристоров на схеме не показаны. Тиристоры и диоды трех фаз A, B и C образуют анодную (VS1, VS3, VS5; VD1, VD3, VD5) и катодную (VS2, VS4, VS6; VD2, VD4, VD6) группы.

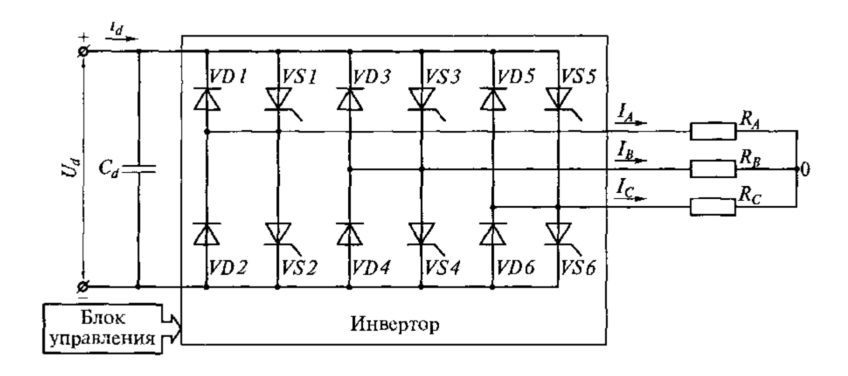



Рис. 10.14. Схема трехфазного мостового инвертора.

Тиристоры анодной и катодной групп могут переключаться по различным алгоритмам: с однократным и многократным переключением на интервале одного периода выходного напряжения. При однократном переключении в течение периода угол проводящего состояния тиристоров может быть равным 180, 150 или 120 эл. град, или в общем случае:
$\pi$ - $\alpha$ эл. град. Одновременно в проводящем состоянии находятся три тиристора: два в анодной и один в катодной группе или один в анодной и два в катодной. Выходные напряжения инвертора могут быть получены из анализа эквивалентных схем, соответствующих шести возможным состояниям инвертора (рис. 10.15). Напряжение источника питания $U_d$ поступает к фазным нагрузкам в соответствии со схемой подключения в данном интервале. Напряжение между анодной или катодной точками и нулевой точкой нагрузки в одной фазе равняется $U_d/3$ или $2U_d/3$ в зависимости от того, две фазы или одна фаза нагрузки в данный момент связаны с соответствующей шиной. В результате фазные напряжения получают трехступенчатую форму, сохраняющуюся независимо от характера нагрузки. Линейное напряжение имеет при этом форму прямоугольников с углом основания 120 эл. град. Эффективное значение фазного и линейного напряжения инвертора соответственно равно: $U_ф = 0{,}45U_d$; $U_л = 0{,}28U_d$. Выходные напряжения несинусоидальны, имеют форму с симметрией третьего рода и описываются нечетными функциями, не кратными трем.

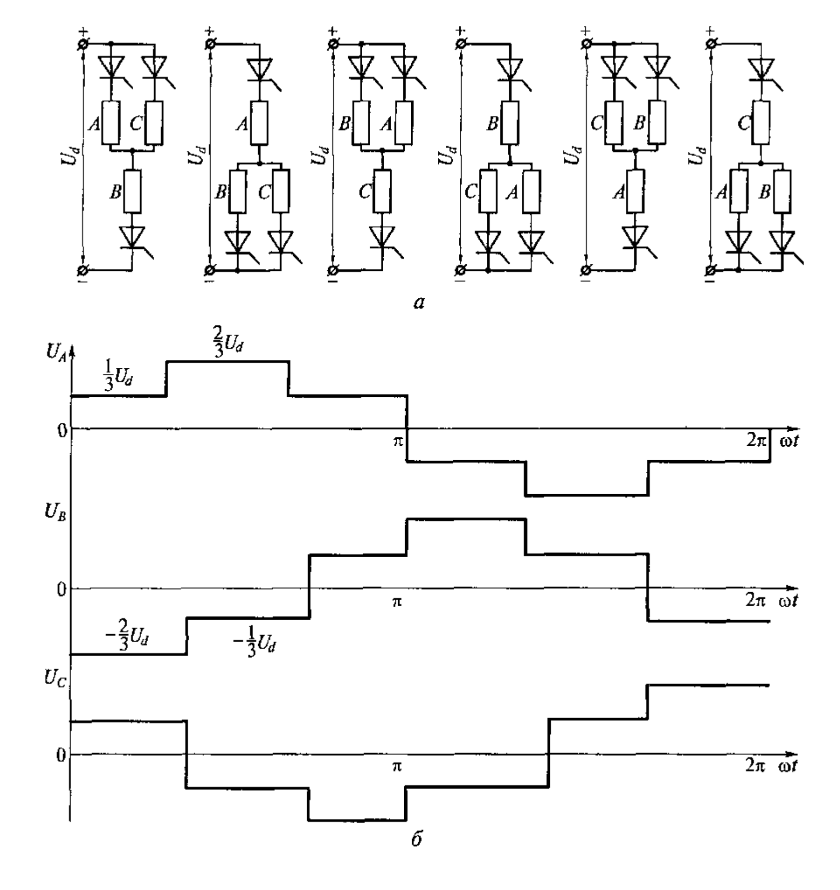



Рис. 10.15. Эквивалентные схемы (*а*) и графики напряжения на фазных нагрузках в зависимости от состояния тиристоров (*б*).

Форма тока в цепи нагрузки зависит от характера нагрузки. При *RL*-нагрузке после очередного переключения тиристоров VS7, VS4, VS6 под действием ЭДС самоиндукции ток в фазе некоторое время сохраняет направление и замыкается по цепи обратных диодов VD2, VD3, VD5 противоположного плеча данной фазы. Этот ток имеет форму, близкую к пилообразной, и содержит кроме постоянной составляющей $I_н$ спектр четных высших гармонических составляющих, кратных шести.

**Однофазный мостовой инвертор тока.** Инвертор такого типа представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока, источник питания которого обладает большим внутренним индуктивным сопротивлением. Индуктивность $L_d$ обеспечивает постоянство потребляемого тока. Электрическая схема автономного инвертора тока включает в себя мост тиристоров VS1–VS4, *RL*-нагрузку, коммутирующие конденсаторы C1, C2, отсекающие диоды VD1–VD4 и блок управления (рис. 10.16, *а*).

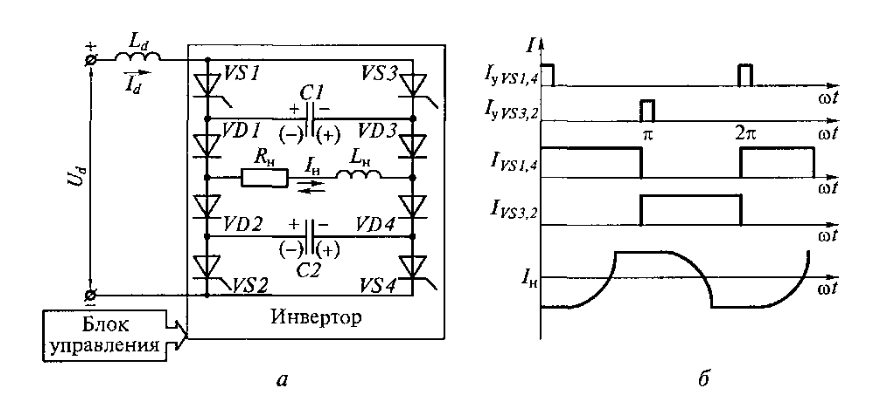



Рис. 10.16. Однофазный мостовой инвертор тока.
*а* – схема; *б* – графики токов.

Коммутирующие конденсаторы Cl, С2 выполняют функцию источников напряжения, прикладываемого в обратном направлении к тиристорам во время выключения, и обеспечивают обмен реактивной энергией с катушкой индуктивности нагрузки. Предположим, что открыты тиристоры VS1 и VS4, а тиристоры VS3 и VS2 закрыты. Ток нагрузки $I_н$ протекает от источника напряжения $U_d$ через дроссель $L_d$, тиристор VS1, диод VD1, *RL*-нагрузку, диод VD4, тиристор VS4 ко второму выводу источника напряжения. Одновременно конденсаторы Cl, С2 заряжаются так, что их левые обкладки положительны (полярность показана без скобок). Ток нагрузки постоянен и равен току источника, т. е. $I_н$ = const, так как индуктивность $L_d \geq L_н$. Напряжение нагрузки в данном состоянии цепей равно:

$$U_н = I_н R_н;\ L_н(dI_н / dt) = 0$$

В момент включения тиристоров VS2 и VS3 тиристоры VS1 и VS4 остаются открытыми. Это создает условия для разряда конденсаторов С1 и С2. Конденсатор С1 разряжается от положительного вывода, через открытые тиристоры VS1 и VS3 на отрицательный вывод, а С2 – от положительного вывода, через открытые тиристоры VS2 и VS4 на отрицательный вывод. Для тиристоров VS1 и VS4 ток разряда является обратным, что приводит к мгновенному переключению тока нагрузки с тиристоров VS1, VS4 на тиристоры VS2, VS3 (рис. 10.16, *б*). Это первая ступень коммутации, в результате которой создаются условия для полного запирания тиристоров VS1, VS4. Напряжение на входе $U_d$ падает до значения: $U_d = I_d R_n - U_{c1} - U_{c2}$. Напряжение на конденсаторах С7, С2 на этом интервале изменяется линейно в процессе перезаряда постоянным током $I_н = I_d$ = const. Конденсаторы полностью разряжены, а тиристоры VS1, VS4 заперты током разряда конденсаторов С1 и С2. В следующий момент конденсаторы С1 и С2 оказываются заряженными током противоположной полярности и напряжение на них в этот момент равно: $U_{c1} = U_{c2} = I_н R_н$. Дальнейшее повышение напряжения приводит к смещению отсекающих диодов VD2, VD3 в прямом направлении, и начинается вторая ступень коммутации в инверторе, сопровождающаяся изменением направления тока в цепи нагрузки. Цепь нагрузки оказывается подключенной параллельно конденсаторам, перезаряженным током обратной полярности. Ток источника напряжения $I_d$ перераспределяется между нагрузкой и конденсаторами, дополнительно заряжая их и вызывая изменение направления тока $I_н$. При этом ток диодов VD2, VD3 увеличивается до значения $I_d$, а ток диодов VD1, VD4 уменьшается до нуля. Напряжение на входе инвертора возрастает и превышает значение $I_d R_н$. На этом полный цикл коммутации завершается. Далее процессы повторяются. Отсекающие диоды отключают конденсаторы Cl, С2 от нагрузки на интервале между коммутациями, поэтому они не участвуют в энергообменном процессе. На интервале коммутации происходит обмен энергией между нагрузкой конденсаторами. Емкость конденсаторов должна быть достаточной для обеспечения времени, необходимого для запирания тиристоров. С другой стороны, емкость конденсаторов определяет значение напряжения, до которого они заряжаются. Это напряжение не должно быть слишком высоким, чтобы параметры тиристоров инвертора не приходилось завышать по максимальному напряжению.

В этой схеме при резком изменении величины нагрузки или размыкании ее цепи возникают высокие перенапряжения на входе инвертора. Поэтому необходимо предусматривать специальную быстродействующую защиту. Короткие замыкания в цепи нагрузки не представляют большой опасности для тиристоров, так как ток ограничивается дросселем с большой индуктивностью.

**Трехфазный мостовой инвертор тока.** По устройству и принципу работы этот инвертор аналогичен рассмотренному однофазному инвертору тока (рис. 10.17) Особенностью является лишь то, что в процессе коммутации конденсаторы С1, С3, С5 и С2, С4, С6 включены в каждый контур тока в виде двух параллельных цепей (один конденсатор и параллельно ему два последовательных конденсатора). В процессе работы открытыми являются один или два тиристора в анодной группе и, наоборот, два или один тиристор в катодной группе.

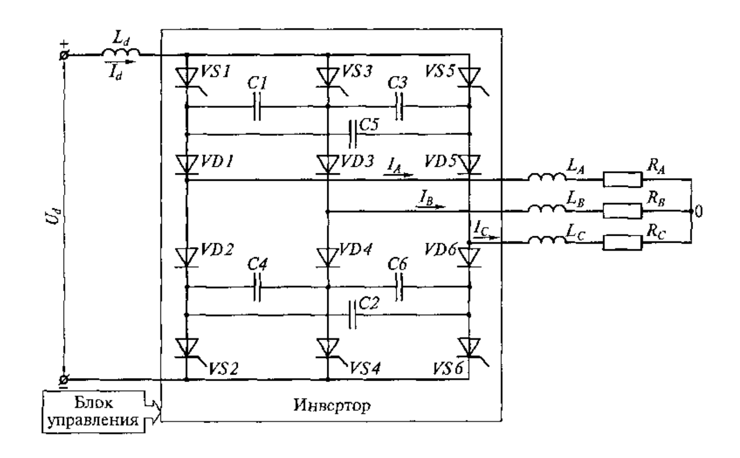



Рис. 10.17. Схема трехфазного мостового инвертора тока.

Будем считать, что в начальный период времени открытыми оказались тиристоры VS1, VS3 в анодной группе и VS6 в катодной. В этом случае к нагрузке фаз А и В приложены напряжения, равные $U_A = U_B = 1/3\ U_d$, а к фазе С – напряжение $U_c = 2/3\ U_d$. При этом протекают соответствующие токи $I_A = I_B = I/3I_d$, $I_C = 2/3I_d$. По конденсаторам анодной группы С1, С3 протекает ток заряда $I_{C1} = I_{C3} = 1/3I_d$, а по конденсатору С5 – ток $I_{C5} = 2/3I_d$. Соответственным образом распределены заряды конденсаторов $U_{C1} = U_{C3} = 1/3U_d$ и $U_{C5} = 2/3U_d$. По конденсаторам катодной группы С4, С6 протекает ток заряда $I_{C4} = I_{C6} = l/3I_d$, а по конденсатору С2 – ток $I_{C2} = 2/3I_d$. Соответственным образом распределены заряды конденсаторов $U_{C4} = U_{C6} = l/3U_d$ и $U_{C2} = 2/3U_d$ Положительный потенциал у всех конденсаторов на левом выводе. Рассмотрим процесс включения тиристора VS2 и выключения тиристора VS1. При коммутации тока с VS1 на VS3 конденсатор С1 включен параллельно конденсаторам С2 и С3, соединенными последовательно между собой. При этом ток источника $I_d$ распределяется по конденсаторам в соотношении $I_{C1} = 2I_d/3$ и $I_{C2} = I_{C3} = I_d/3$. В межкоммутационный интервал перед коммутацией тиристора VS1 в момент $\omega t = 2\pi/3$ ток нагрузки проводят тиристоры VS1 и VS6. Конденсаторы Сl, С5 заряжены, а конденсатор С3 разряжен. Исследуем коммутацию от момента включения VS2 Конденсатор С1 после включения VS2 подключен последовательно к VS1 и запирает последний обратным напряжением. Ток нагрузки теперь протекает через VS3. Ток тиристора VS3 распределяется: 2/3 его протекает через С1, а 1/3 – через С3 и С5. при этом через отсекающий диод VD3 ток не протекает до тех пор, пока напряжение $U_{c1}$ не станет ниже значения $I_dR_A$. При дальнейшем снижении $U_{c1}$ потенциал анода VD3 становится положительным, диод открывается и его ток нарастает от нуля до значения $I_d$. Ток же диода VD1 уменьшается от значения $I_d$ до нуля. Коммутация проходит в два этапа: мгновенное переключение тока в тиристорах и постепенное переключение тока в цепи нагрузки. Действующее значение фазного тока: $I_ф = 0{,}78I_d$

## 10.5. Расчет и выбор силовых полупроводниковых приборов.

Определение допустимого среднего тока. При некотором среднем прямом токе $I_{FAV}$ в полупроводниковом приборе возникают потери мощности $P_F$. Этой мощности соответствует температура нагрева полупроводниковой структуры $\theta_J$, которая не должна превышать максимально допустимого значения $\theta_{Jmax}$. Температура $\theta_J$ при данной мощности потерь $P_F$ определяется интенсивностью отвода теплоты, определяемой тепловым сопротивлением $R_T$. В состоянии теплового равновесия при протекании тока $I_{FAV}$ мощность выделяющихся тепловых потерь $P_F$ равна мощности, отводимой от полупроводниковой структуры. Из этого условия определяется среднее максимально допустимое значение прямого тока, протекающего по полупроводниковому прибору:

$$I_{FAV} = \sqrt{\left(\frac{U_{TO}}{2k_{\Phi}^2 r_T}\right)^2 + \frac{\theta_{J\max} - \theta_J}{k_{\Phi}^2 r_T R_T}} - \frac{U_{TO}}{2k_{\Phi}^2 r_T} \quad (10.25)$$

где $U_{TO}$ – пороговое напряжение полупроводникового прибора, В; $r_T$ – дифференциальное сопротивление, Ом; $k_{\Phi}$ – коэффициент формы тока.

**Определение максимально допустимой амплитуды тока.** Пользуясь выражением (10.25), можно определить максимально допустимый средний ток полупроводниковых приборов. Однако в современных преобразователях и аппаратах в большинстве случаев токовая нагрузка силового полупроводникового прибора имеет импульсный характер. При импульсной нагрузке приборы работают с большими амплитудами токов и меньшими углами проводимости. Расчет по среднему значению тока дает значительное превышение максимальной температуры полупроводниковой структуры по отношению к среднему значению. Поэтому при импульсных нагрузках для заданной частоты следования управляющих импульсов определяют максимально допустимую амплитуду тока. Для такого расчета используется суммарная мощность $P_{dev}$ потерь в приборах, по которой определяется температура структуры $\theta_J$ в конце импульса управления. Максимально допустимая амплитуда тока для диодов и тиристоров при импульсной нагрузке определяется по формуле:

$$I_{FAV\max} = \frac{\sqrt{U_{TO}^2 + 4r_T P_{d\max}} - U_{TO}}{2r_T} \quad (10.26)$$

где $P_{d\max}$ – максимально допустимая мощность суммарных потерь полупроводникового прибора в импульсе, Вт.

**Расчет рабочей перегрузки.** В случае возникновения аварийного режима полупроводниковые приборы и другие токоведущие элементы схемы преобразователя электрической энергии подвергаются перегрузкам по току. При этом полупроводниковые приборы, как правило, оказываются наиболее слабыми элементами цепи по токовой перегрузке вследствие сравнительно низких значений максимально допустимой рабочей температуры (не более 140°С). Критериями оценки работоспособности приборов при токовых перегрузках являются:

• перегрузочные характеристики;
• аварийные перегрузочные характеристики;
• ударный неповторяющийся ток;
• защитный показатель.

При этом виде перегрузок диод должен выдержать обратное напряжение, а тиристор, кроме этого, не должен переключаться в открытое состояние без подачи управляющего сигнала.

Перегрузочные характеристики для аварийных режимов определяются исходя из того, что тиристор теряет управляющую способность вследствие превышения максимально допустимой температуры, но не пробивается обратным напряжением. Ударный неповторяющийся ток $I_{TSM}$ и защитный показатель $\int I^2_{FAV}dt$ представляют собой параметры, превышение которых вызывает повреждение приборов вследствие теплового пробоя структуры. Использование этих показателей при расчете предполагает однократное воздействие. Показатель $\int I^2_{FAV}dt$ используют при определении параметров защиты преобразовательного устройства плавкими предохранителями. Для кратковременных перегрузок длительностью в один полупериод (10 мс) допустимый ток перегрузки можно найти исходя из допущения, что переходный тепловой процесс определяется эквивалентным импульсом длительностью $t$ = 6 мс, а переходное тепловое сопротивление равно $q_T$. За это время температура структуры повышается до максимально допустимого значения при мощности потерь $P_T$. Таким образом,

$$I_{T\max} = \frac{\sqrt{U_{TO}^2 + 4r_T\left(\frac{\theta_{J\max} - \theta_J}{q_T} + P_T\right)} - U_{TO}}{2r_T} \qquad (10.27)$$

Для более продолжительных перегрузок длительностью от нескольких периодов до 100 с, когда теплота от полупроводниковой структуры начинает рассеиваться в окружающую среду, допустимый ток перегрузки находится из условий работы с длительной серией импульсов перегрузки.

## 10.6. Групповое соединение полупроводниковых приборов.

Последовательное и параллельное соединение полупроводниковых приборов, применяемое для увеличения допустимых значений тока и напряжения в одной ветви мощного преобразователя, называется *групповым соединением*. Групповое соединение иногда применяется также для повышения надежности преобразователей, чтобы выход из строя отдельного прибора не нарушал работы всей установки. Из-за технологического разброса вольт-амперной характеристики при параллельном соединении отдельные полупроводниковые приборы перегружаются по току, а при последовательном – по напряжению. При групповом соединении тиристоров условия работы еще более ухудшаются из-за разброса временных характеристик. В динамических режимах приложения прямого напряжения при последовательном соединении тиристор с меньшим временем восстановления может оказаться под воздействием полного напряжения цепи и самопроизвольно включаться. При параллельном соединении тиристор, имеющий меньшее время включения, воспринимает весь ток главной цепи и может выйти из строя по причине теплового пробоя. Для обеспечения надежной работы силовых полупроводниковых приборов при их групповом соединении должны применяться меры для равномерного распределения тока при параллельном и напряжения при последовательном соединениях.

**Последовательное соединение диодов.** Если требуется получить большие значения выпрямленного напряжения, применяют последовательное соединение диодов. Построение преобразовательной установки с одиночными диодами в этом случае не представляется возможным из-за недопустимо высокого обратного напряжения, которое будет приложено к силовым полупроводниковым приборам (рис. 10.18, *а*). Например, в выпрямительных установках тепловозов 2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7 и электровозов ВЛ60, ВЛ80 применяют диоды 7-го и 8-го классов, рассчитанные на номинальное напряжение 700…800 В. Однако номинальное напряжение на выходе выпрямительной установки составляет 1450...1650 В, а обратное напряжение в переходных процессах может достигать 4000 В.

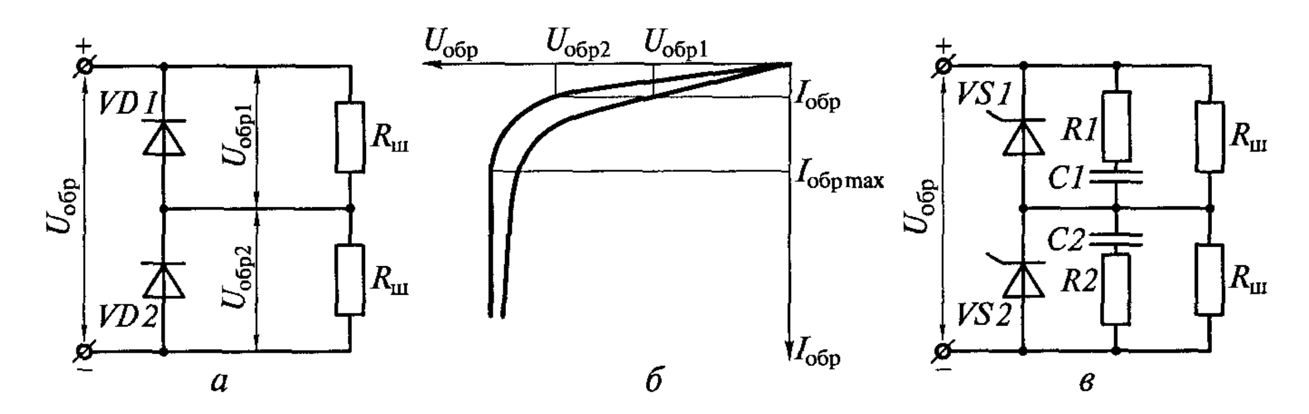



Рис. 10.18. Последовательное включение силовых полупроводниковых приборов.
*а* – схема соединения; *б* – вольтамперные характеристики вентилей;
*в* – схема соединения с выравниванием обратных напряжений.

Число последовательно соединенных диодов в каждой фазе выпрямительной схемы с нулевым выводом или в каждом плече мостовой схемы выбирают так, чтобы напряжение на одном диоде при нормальном рабочем режиме не превышало его номинального повторяющегося обратного напряжения: $n_{посл} = k_{нер}k_{п}U_{обрmax} / k_{в}U_{ном}$ (10.28)
где $k_{нер}$ – коэффициент неравномерности распределения напряжения по последовательно включенным приборам (для лавинных диодов $k_{нер}$ = 1,0, для других $k_{нер}$ = 1,2...1,3); $k_{п}$ – коэффициент перенапряжений ($k_{п}$ = 1,2); $U_{обрmax}$ – максимальное обратное напряжение, приложенное к диоду, В; $k_{в}$– коэффициент, который зависит от типа применяемых диодов (для кремниевых диодов $k_{в}$ = 1,2). Перенапряжения на отдельных диодах, включенных последовательно, вызываются различными сопротивлениями отдельных диодов и различием их вольтамперных характеристик (рис. 10.18, *б*). Например, при последовательном включении диодов VD1 и VD2 с различными вольтамперными характеристиками общее обратное напряжение $U_{обр}$ распределяется между ними неравномерно, так как при некотором общем обратном токе $I_{обр}$ к диодам приложены разные напряжения $U_{обр1}$ и $U_{обр2}$. При увеличении температуры диодов эта разница и $I_{обрmax}$ могут значительно возрасти. При последовательном включении диодов для равномерного распределения напряжения между ними параллельно диодам включают шунтирующие резисторы $R_{Ш}$. Эти резисторы образуют делитель напряжения, который делит общее обратное напряжение $U_{обр}$, приложенное ко всем диодам, на равные части $U_{обр1} = U_{обр2}$ независимо от внутренних сопротивлений диодов. Сопротивления шунтирующих резисторов выбирают так, чтобы протекающий по ним ток был в несколько раз больше наибольшего обратного тока, протекающего через включенные последовательно диоды. Во избежание больших потерь энергии рекомендуется специально подбирать последовательно включаемые диоды по их вольтамперным характеристикам: диоды должны иметь одинаковый класс, близкие обратные ветви характеристики и одинаковые температурные коэффициенты. Лавинные диоды, которые допускают большие значения обратных токов, соединяют последовательно без шунтирующих резисторов. Если напряжение на каком-либо диоде, например VD1, достигает напряжения стабилизации, при котором происходит лавинный пробой, то дальнейшего увеличения обратного напряжения на данном диоде не происходит. Поэтому для лавинных диодов запас максимально допустимого напряжения составляет 1,3...1,5 $U_{обрmax}$ вместо 2...3 $U_{обрmax}$ для обычных диодов.
В случае применения тиристоров для выравнивания обратных напряжений используют резисторные делители напряжения и *RC*-цепочки (R1C1, R2C2), обеспечивающие снижение скорости нарастания прямого напряжения $dU_{d} /dt$ (рис. 10.18, *в*).

**Параллельное соединение диодов.** Для получения большого выпрямленного тока применяется параллельное соединение диодов (рис. 10.19, *а*). Число параллельно включенных диодов выбирают так, чтобы ток, проходящий через каждый диод, не превышал номинального тока. При параллельном соединении нескольких диодов из-за различия прямых ветвей их вольтамперных характеристик распределение тока между диодами оказывается неравномерным. Больший ток протекает через диод, имеющий меньшее падение напряжения, т.е. более крутую вольтамперную характеристику (рис. 10.19, *б*). Например, при параллельном соединении диодов VD1 и VD2 с различными вольтамперными характеристиками напряжение A $U_{В}$, приложенное к диодам, при включении в прямом направлении одинаково, а токи разные. Ток $I_{в2}$, проходящий через диод VD2, больше тока $I_{в1}$ в диоде VD1. Такая неравномерность в распределении тока нагрузки приводит к недопустимому нагреву диода и требует снижения мощности преобразователя. Для сглаживания неравномерности в распределении токов по отдельным параллельным ветвям специально подбирают диоды по их прямым вольтамперным характеристикам. При этом стремятся, чтобы параллельно включенные диоды имели близкие по величине падения напряжения (разность не более 0,02 В). Но даже и в этом случае неравномерность в распределении токов составляет около 20%. На это значение приходится снижать общий ток $I_{d}$ выпрямительной установки.

Количество параллельно включенных диодов можно ориентировочно определить исходя из соотношения: $n_{пар} = k_{нер}k_{п}I_{dmax} / I_{ном}$ (10.29)

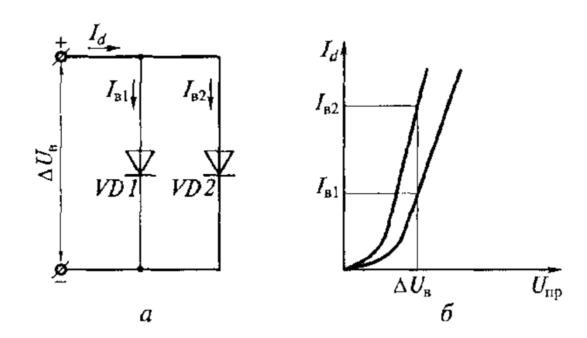



Рис. 10.19. Параллельное включение силовых полупроводниковых приборов.
*а* – схема соединения, *б* – вольтамперные характеристики вентилей.

где $k_{нер}$ – коэффициент неравномерности распределения токов по параллельно включенным приборам (для большинства диодов промышленного применения $k_{нер}$ = 1,2...1,3); $k_{п}$ – коэффициент возможных перегрузок по току ($k_{п}$ = 1,2); $I_{dmax}$ – максимальный выпрямленный ток, А; $I_{ном}$ – номинальный ток диода, А. При конструировании полупроводникового преобразователя задачу деления тока решают в каждом конкретном случае на основе технико-экономического обоснования. В частности, в локомотивных выпрямительных установках эта задача решена за счет более чем двукратного запаса по мощности. Длительный период монопольное положение среди силовых полупроводниковых приборов, используемых в статических преобразователях энергии, занимали силовой биполярный транзистор и обычный тиристор. Применение этих приборов позволило сделать качественный скачок в развитии силовой электроники. Однако присущие им недостатки в дальнейшем стали сдерживающими факторами в этой области. Принципиальными недостатками биполярного транзистора являются значительная мощность, потребляемая на управление, и большое напряжение насыщения. Недостатки тиристора – неполная управляемость и сравнительно низкое быстродействие ($f_s \leq 1$ кГц). Это проявляется в необходимости принудительной коммутации тиристора при его выключении. В результате затрудняется практическая реализация схем выпрямительно-инверторных преобразователей. Новые перспективы в принципиальном совершенствовании параметров транзисторов в части существенного снижения мощности управления и повышения быстродействия открыло создание силового МОП-транзистора. В настоящее время МОП-транзисторы используются на рабочие напряжения, не превышающие 400 В. Из-за относительно высоких значений сопротивления мощные МОП-транзисторы уступают биполярным в отношении потерь мощности в проводящем состоянии. Компромиссным техническим решением, позволившим реализовать положительные качества как биполярных, так и МОП-транзисторов, стало создание IGBT-транзисторов (биполярный транзистор с полевым управлением). Эти транзисторы обладают хорошими частотными свойствами ($f_s > 20$ кГц), крайне низкими значениями мощности управления и падения напряжения (2,5... 3,5 В) в проводящем состоянии при рабочих напряжениях до 1700 В и токе 1200 А. Благодаря этим качествам область использования IGBT-транзисторов постоянно расширяется и начинает занимать доминирующее положение в устройствах преобразовательной техники средней и большой мощности. На основе IGBT-транзисторов в настоящее время разрабатывается большинство силовых электронных устройств. Практически все крупнейшие фирмы мира, производящие электронную продукцию, развивают новые технологии IGBT-транзисторов. Появилась возможность создания унифицированной схемы выпрямительно-инверторного преобразователя энергии VT1– VT6. С использованием модулей IGBT-транзисторов разработан статический преобразователь энергии для привода переменного тока скоростного электропоезда «Сокол» (рис. 10.20).

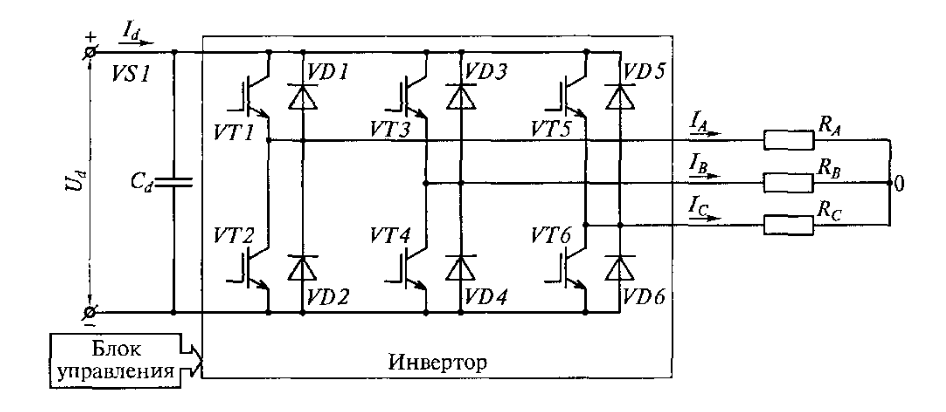



Рис. 10.20. Статический преобразователь энергии электропоезда «Сокол»

Для увеличения допустимого диапазона рабочих мощностей статического преобразователя энергии IGBT-транзисторы могут работать параллельно. При этом для обеспечения оптимального распределения токов должно быть выполнено следующее условие: параллельно включенные IGBT -транзисторы должны быть расположены рядом друг с другом для обеспечения одинаковых условий работы. По этой причине они выполняются в виде модулей из двух, четырех или шести транзисторов с отсекающими диодами на общей подложке.

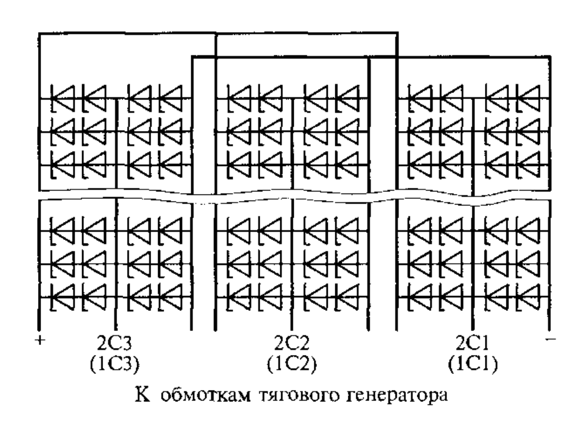



Рис. 10.21. Выпрямительная установка УВКТ-5 тепловоза.

Все силовые электрические соединения должны быть выполнены симметрично и с минимальной индуктивностью соединений. Соединения между схемой управления и параллельно включенными IGBT-транзисторами также должны быть симметричны и обладать минимальной индуктивностью. Значения порогового напряжения затвора и напряжения насыщения открытого транзистора должны быть близкими.

**Параллельно-последовательное соединение диодов**. В мощных высоковольтных полупроводниковых преобразователях электроэнергии применяется параллельно-последовательное соединение диодов. В этом случае предпочтение отдают лавинным диодам, так как технология их изготовления обеспечивает более равномерную структуру *p* – *n*-перехода и меньший разброс вольтамперных характеристик, чем у простых диодов. Например, в одном плече тепловозной выпрямительной установки УВКТ-5 имеется десять параллельных ветвей по два последовательно соединенных диода в ветви (рис. 10.21).

## 10.7. Системы управления статическими преобразователями.

Требования к системам управления полупроводниковыми преобразователями. Эти системы должны соответствовать следующим требованиям.

1. Создавать синхронизированную с напряжением питающей сети *m*-фазную систему

импульсов управления, каждый из которых способен включить силовой полупроводниковый прибор, применяемый в схеме преобразования.
2. Обеспечивать требуемый сдвиг по фазе импульсов управления относительно напряжения питания.
3. Для надежного открывания силовых полупроводниковых приборов, применяемых в преобразователях напряжения и имеющих различные значения сопротивления управляющего перехода, вырабатывать такие значения тока и напряжения управления, которые обеспечивают их гарантированное включение с учетом максимальной мощности, выделяемой на управляющем переходе.
Так как сопротивление управляющего перехода силовых полупроводниковых приборов обычно составляет 20...30 Ом, а выпрямленный ток $I_d$ = 50...500 А, то напряжение на выходе устройства управления должно быть не более 12 В. Это свойство силовых полупроводниковых приборов дает возможность применять в системах управления маломощные полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, интегральные микросхемы и т.п.).
4. Обратное напряжение, подаваемое на управляющий электрод силовых полупроводниковых приборов, не должно превышать 1,0 В. Наличие обратного напряжения на управляющем электроде может привести к увеличению обратного тока и выходу его из строя.
5. Для четкого открытия силовых полупроводниковых приборов и уменьшения мощности потерь во всех режимах работы формируемые импульсы управления должны иметь крутой передний фронт.
6. Для предотвращения неравномерной нагрузки фаз симметрия управляющих импульсов, подаваемых на приборы различных фаз, должна поддерживаться с точностью 1...2 эл. град, во всем диапазоне фазового управления.
7. Для возможности регулирования выходного напряжения от нуля до максимального значения должен быть обеспечен полный диапазон изменения угла управления α.
**Основные узлы систем управления.** Разработано большое количество систем управления силовыми полупроводниковыми приборами, число которых непрерывно возрастает. Это обусловлено широким развитием силовой полупроводниковой техники и постоянным расширением областей ее применения. Современные системы управления выполняются на основе полупроводниковых и магнитных элементов. С развитием микроэлектроники широкое применение в системах управления находят различные интегральные микросхемы и микропроцессорные устройства. В качестве магнитных элементов преимущественно используются импульсные трансформаторы. По способу обработки сигналов системы управления делятся на *аналоговые,* в которых входной и выходной сигналы представляют собой непрерывные величины, и *цифровые,* в которых входной и выходной сигналы являются дискретными величинами. Входные устройства предназначены для формирования напряжений управления, подаваемых на управляющие электроды и синхронизированных с переменным напряжением $U_2$, и распределения их по каналам управления соответственно алгоритму подключения силовых полупроводниковых приборов. Так, при трехканальной системе управления выпрямителями на тиристоры должны поступать отпирающие импульсы, сдвинутые относительно друг друга на угол 120 эл. град. Для управления тиристорами шестифазного выпрямителя с нулевой точкой система управления должна формировать отпирающие импульсы, сдвинутые один относительного другого на угол 60 эл. град. Чаще всего в качестве входных устройств используются микропроцессорные устройства. Они включают в себя три основные, достаточно четко выраженные как функционально, так и конструктивно составные части (подсистемы): вычислительную, интерфейсную и электропитания (рис. 10.22).

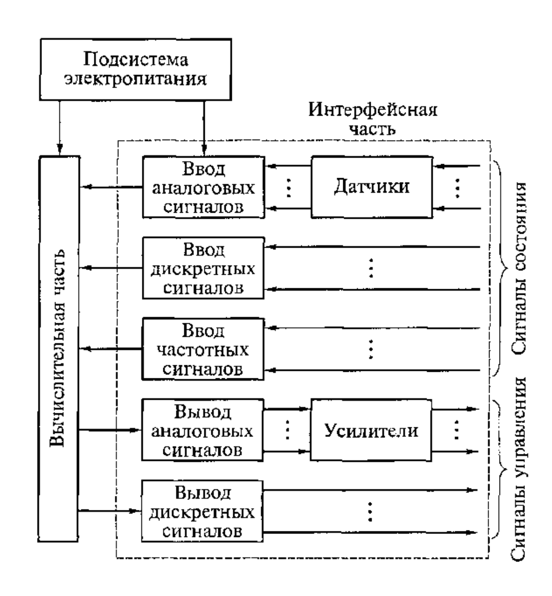



Рис. 10.22. Функциональная схема микропроцессорной системы регулирования.

Аппаратура микропроцессорных систем осуществляет ввод информации от датчиков или командных устройств, логическую обработку этой информации в заданной последовательности и вывод полученных результатов для управления исполнительными устройствами. Задачи, решаемые каждым конкретным устройством, определяются алгоритмом его работы – упорядоченной последовательностью действий с конечным числом операций, приводящей к получению определенного результата. Последовательность выполнения операций (программа работы) закладывается в структуру электрической схемы и связи между программными и аппаратными средствами – электронными и электромеханическими элементами, входящими в состав системы. Практика создания микропроцессорных автоматических систем подтвердила целесообразность их выполнения в виде специализированных модулей, проблемно и функционально ориентированных в рамках определенных задач, алгоритмов и функций. Под *модулем* в данном случае понимается конструктивно законченное устройство, позволяющее самостоятельно или в совокупности с другими модулями решать вычислительные или управляющие задачи заданного класса. Характерной особенностью такого построения систем является то, что независимо от решаемых задач электрическая схема и набор функциональных модулей могут оставаться постоянными. Различие в системах сводится к реализации заданных алгоритмов управления.

Вычислительная часть системы обычно представлена модулем процессора – кристаллом большой или сверхбольшой интегральной микросхемы (СБИС), который содержит все логические элементы, необходимые для образования полноценной вычислительной системы. По своим возможностям и быстродействию он примерно соответствует микроЭВМ, но не имеет (за ненадобностью) клавиатуры, дисковода, жесткого диска, видеосистемы и столь большого, как у его стационарного прототипа, объема оперативной памяти. Вычислительная часть предназначена для обработки числовой информации о состоянии объекта регулирования и определения необходимых управляющих воздействий на объект. Микропроцессор со вспомогательными устройствами называется *микроконтроллером,* который по своей природе является роботом. Он обладает массой возможностей, но не сделает ничего, если ему не сообщить, что делать. Указания для него находятся в памяти, например в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ), которое хранит управляющую программу.

Внутренняя структура, или, как говорят, *архитектура* микроконтроллера, определяется его функциями. Обработку и пересылку данных микропроцессор, входящий в состав микроконтроллера, осуществляет с помощью наборов электрических импульсов, соответствующих его машинному языку. Алфавит этого языка имеет всего два символа: 0 и 1. Выбор такого алфавита объясняется тем, что технически наиболее просто различить одно

из двух возможных состояний элементарного электрического сигнала. Для осуществления операций с двоичными сигналами в составе микропроцессора имеется набор цифровых устройств – триггеров, регистров, счетчиков, сумматоров и различных комбинационных логических схем. К основным характеристикам микропроцессора относят:

• длину слова (число битов в одной кодовой комбинации)
• число и схему организации внутренних регистров.
• число портов для ввода и вывода информации.
• набор команд.
• быстродействие – число операций за одну секунду.

Чем выше численное значение указанных характеристик, тем большими возможностями обладает микропроцессор. *Синхронизация* работы микропроцессорной системы представляет собой точное временное согласование работы всех ее частей для выполнения заданных операций. Минимальный промежуток времени, фиксируемый в микроконтроллере периодом системных тактовых сигналов, соответствует времени выполнения одной микрооперации. Этот показатель определяет максимальное быстродействие машины по отношению к элементарным преобразованиям информации. Системные тактовые сигналы поступают в том или ином виде на все устройства микропроцессорной системы. *Интерфейсная часть* системы (от англ. interface – стык, область контакта, взаимодействия) включает в себя средства ввода аналоговых сигналов, дискретных и частотных сигналов датчиков, а также средства вывода аналоговых, дискретных и управляющих сигналов. Кроме того, к интерфейсной части системы относятся датчики, обеспечивающие первичное преобразование аналоговых сигналов. Электрические схемы вычислительного устройства и статических преобразователей должны быть гальванически развязаны. *Гальваническая развязка* высоковольтных (объекта регулирования) и низковольтных (вычислительного устройства) цепей предназначена для исключения повреждения последних пиковыми выбросами напряжения. Такие выбросы всегда присутствуют в цепях, коммутирующих индуктивные нагрузки (катушки реле, контакторы и электропневматические вентили). Развязка является необходимым условием надежной работы вычислительного устройства микропроцессорной системы.

Под гальванической развязкой подразумевается передача сигнала от источника к приемнику при отсутствии их (источника и приемника) гальванической связи (т.е. непосредственной связи электрическими проводниками). Для передачи электрического сигнала между гальванически развязанными цепями чаще всего используется либо энергия магнитного поля (трансформаторная развязка, рис. 10.23), либо энергия светового излучения (оптронная развязка, рис. 10.24), чаще всего для уменьшения внешних воздействий в инфракрасном диапазоне. При работе с высоковольтными аналоговыми электрическими сигналами (например, напряжение и ток силовой схемы локомотива) их гальваническая развязка, а также, при необходимости, первичное масштабирование (пропорциональное понижение уровня) сигнала осуществляется в специальных устройствах, называемых датчиками. При измерении неэлектрических величин датчики осуществляют также преобразование физической природы сигнала.

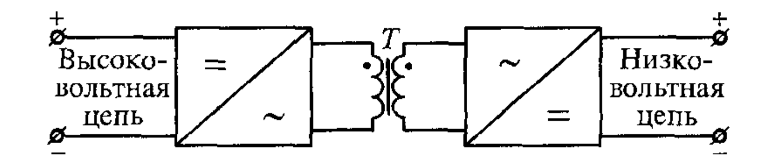



Рис. 10.23. Схема трансформаторной гальванической развязки.

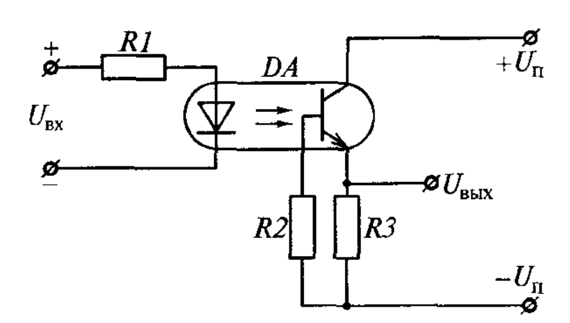



Рис. 10.24. Схема оптронной гальванической развязки.
DA – оптрон; $U_п$ – напряжение питания.

Например, перемещение реек топливных насосов высокого давления (ТНВД) преобразуется с определенным масштабным коэффициентом в электрическое напряжение на соответствующем входе интерфейсной части микропроцессорной системы. *Подсистема электропитания* предназначена для формирования напряжений питания, необходимых для работы всех составных частей системы. Она обязательно присутствует в бортовых системах регулирования силовых установок транспортных средств, поскольку бортовые сети последних не приспособлены для питания подобных устройств, но может отсутствовать в стационарных системах, питаемых от внешних источников питания. Все сказанное справедливо для любой микропроцессорной системы автоматического регулирования и управления (локомотива, автомобиля, самолета, прокатного стана и т.д.).

**Работа микропроцессорной системы.** Логика работы микропроцессорной системы, т.е. порядок ее взаимодействия с объектом, полностью определяется управляющей программой вычислительной части системы. *Управляющей программой* называется циклически замкнутая, непрерывно выполняемая вычислительной частью системы последовательность операций. Эта последовательность обеспечивает определенный порядок взаимодействия микропроцессорной системы регулирования с объектом регулирования. Сам порядок взаимодействия, реализуемый управляющей программой, называется алгоритмом работы системы.

*Фазосдвигающие устройства* используются в системах управления статическими преобразователями для регулирования фазы управляющих импульсов. Схемы получения управляющих импульсов и сдвига их по фазе в реальных фазосдвигающих устройствах бывают различными. В электромагнитных системах управления (например, на тепловозе 2ТЭ116 это блок БА-520) переменное напряжение сначала изменяется по форме, а затем сдвигается по фазе (рис. 10.25). Блок БА-520 состоит из функциональных узлов: синхронизирующей цепи (СЦ), преобразователя напряжения (ПН), широтно-импульсного модулятора (ШИМ), сдвигающей цепочки (РЦ) и двух блокинг-генераторов (БГ).

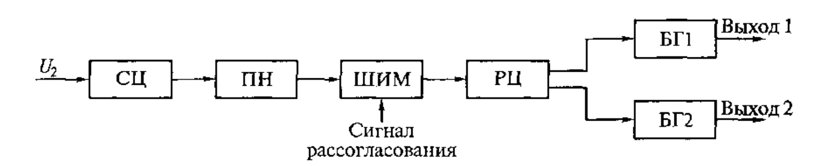



Рис. 10.25. Функциональная схема блока БА-520.

СЦ – синхронизирующая цепь; ПН – преобразователь напряжения; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; РЦ – сдвигающая цепочка; БГ1 и БГ2 – блокинг-генераторы.

Входное переменное напряжение подается на синхронизирующую цепь, осуществляющую переключение транзисторов ПН синхронно с частотой напряжения питания. Преобразователь напряжения питает ШИМ, который через сдвигающую цепочку (РЦ)

запускает поочередно блокинг-генераторы. На выходах блокинг-генераторов формируются импульсы заданной длительности и напряжения. Фазосдвигающее устройство (рис. 10.26) содержит генератор опорного напряжения (ГОН), выходное напряжение которого равно напряжению $U_2$ и нуль-орган (НО). На вход нуль-органа, кроме опорного напряжения $U_{оп}$, в данном случае имеющего пилообразную форму, подается внешнее напряжение $U_у$. В момент равенства напряжений $U_{оп}$ и $U_у$ нуль-орган переключается. При изменении значения $U_у$ изменяется момент времени переключения нуль-органа, в результате изменяется фаза управляющих импульсов относительно начала положительной полуволны напряжения $U_2$. Нуль-орган фазосдвигающего устройства имеет выходной сигнал малой мощности и произвольной формы. Поэтому для получения управляющих импульсов требуемой формы и длительности, гальванической развязки системы управления с силовой частью статического преобразователя, усиления импульсов и размножения их при групповом соединении силовых полупроводниковых приборов предназначен один узел, именуемый обычно формирователем импульсов (ФИ).

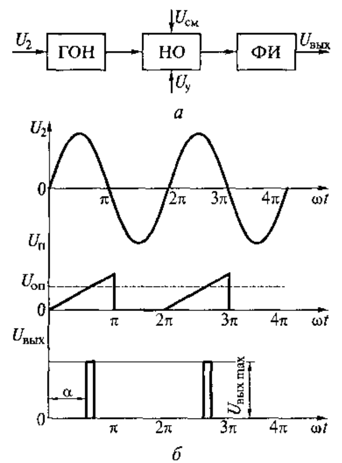



Рис. 10.26. Функциональная схема (*а*) и диаграммы работы (*б*) фазосдвигающего устройства: ГОН – генератор опорного напряжения; НО – нуль-орган; ФИ – формирователь импульсов

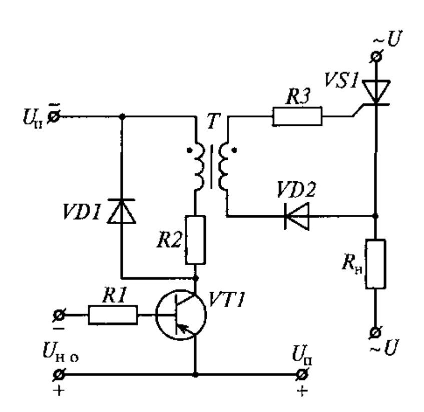



Рис. 10.27. Схема транзисторного формирователя импульсов.

На рис. 10.27 приведена схема транзисторного формирователя импульсов. Когда с выхода нуль-органа на базу транзистора VT1 поступает импульс напряжения управления $U_{но}$, транзистор VT1 открывается и через первичную обмотку трансформатора Т протекает кратковременный импульс тока. Со вторичной обмотки трансформатора усиленный короткий импульс тока $I_у$ поступает на управляющий электрод тиристора VSL. При параллельном или последовательном соединении тиристоров трансформатор Т может иметь несколько выходных обмоток. Резистор R2 ограничивает коллекторный ток во время насыщения трансформатора. Диод VD1 защищает транзистор от перенапряжения при его

выключении. Диод VD2 не пропускает отрицательные импульсы вторичной обмотки трансформатора Т на управляющий электрод тиристора. Для управления мощными тиристорами широкое применение нашли формирователи импульсов на маломощных тиристорах с малыми токами управления (рис. 10.28). В исходном состоянии конденсатор С заряжается от источника задающего напряжения $U_п$ через VD1. При подаче импульса напряжения $U_{вх}$, поступающего с выхода нуль-органа, открывается вспомогательный тиристор VS1 и конденсатор С разряжается по цепи: первичная обмотка трансформатора Т – R2 – VS1. Параметры этой цепи выбирают так, чтобы в первичной обмотке протекал короткий импульс тока, а на вторичной – индуцировался узкий импульс тока $I_у$ с крутым передним фронтом для гарантированного открытия силового тиристора VS2.

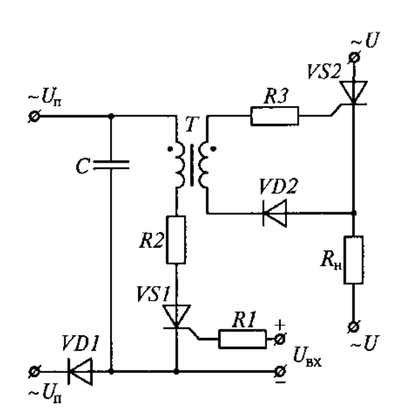



Рис. 10.28. Схема тиристорного формирователя импульсов.

Использование трансформаторов для гальванической развязки системы управления и силовой части преобразователя имеет некоторые недостатки. В процессе коммутации тиристоров импульсами тока большой амплитуды в разрядных цепях сопровождается высоким уровнем помех. Из-за наличия паразитных (электромагнитных и емкостных) связей между первичной и вторичной обмотками эти помехи распространяются по соединительным проводам. Более перспективным средством обеспечения гальванической развязки в цепях преобразователя и повышения помехозащищенности является применение схем формирователей импульсов с оптоэлектронными приборами. В качестве управляемого элемента в таких формирователях импульсов используются диодные, транзисторные и тиристорные оптоэлектронные приборы. На рис. 10.29 представлена одна из типовых оптоэлектронных схем, используемых в качестве конечного узла формирователя импульсов для коммутации силового тиристора VS1. Схема состоит из входного формирователя сигнала управления, выполненного на инверторе DD1, оптрона гальванической развязки DA1 и силового транзистора VT1. Диоды VD1 и VD2 служат для защиты силового транзистора VT1 и выходного транзистора оптрона DA1 от превышения напряжения и напряжения обратной полярности.

Работа схемы сводится к следующему. При низком уровне напряжения $U_{но}$ на входе инвертора DD1 на его выходе устанавливается высокий уровень напряжения, в результате чего светодиод и фототранзистор оптрона DA1 находятся в закрытом состоянии. Делитель напряжения R5–R4 подает на затвор силового транзистора VT1 напряжение положительной полярности, которое удерживает его в открытом состоянии. В этих условиях импульсы управления силовым тиристором VS1 не формируются. Если на входе инвертора DD1 устанавливается высокий уровень напряжения, то на его выходе будет низкий уровень. При этом светодиод оптрона DA1 открывается положительным напряжением $U_{п1}$, и его излучение в свою очередь открывает фототранзистор оптрона DA1. В результате шунтируется переход затвор – сток силового транзистора VT1 и последний закрывается, подавая импульс управления от $U_{п2}$ через резистор R6 на управляющий электрод силового тиристора VS1.

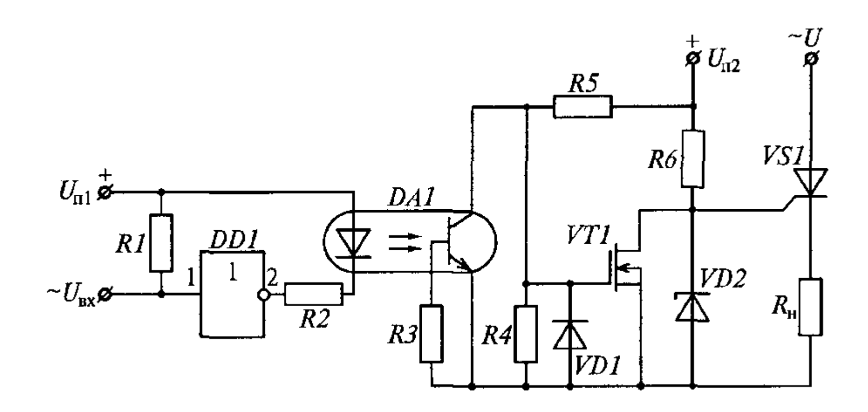



Рис. 10 29. Схема формирователя импульсов системы УСТА (унифицированная система тепловозной автоматики)

Описанная схема формирователя импульсов обеспечивает полную гальваническую развязку цепей управления и нагрузки преобразователя, а также помехозащищенность схемы в закрытом состоянии. Это обусловлено тем, что светодиод оптрона имеет собственный порог срабатывания.

**Коммутация тиристоров преобразователей напряжения.** Для принудительного запирания тиристора, включенного в цепь постоянного тока, приходится применять специальные меры. Выключить тиристор можно, уменьшая прямой ток ниже значения тока удержания, но в этом случае время запирания тиристора будет относительно большим. Чтобы закрыть тиристор в течение минимального времени, к нему нужно приложить обратное напряжение. Тиристор запирается с помощью искусственной (принудительной) коммутации, которая осуществляется кратковременным пропусканием через него тока в обратном направлении. В результате чего его анодный ток уменьшается до значения тока выключения. Обратный ток и напряжение могут быть получены от специального источника постоянного тока, но в большинстве случаев этим источником является предварительно заряженный конденсатор, называемый *коммутирующим*. Если для выключения силовых тиристоров используются специальные коммутирующие тиристоры, то коммутация называется *искусственной*. В этом случае для выключения силовых тиристоров на коммутирующие тиристоры подают управляющие импульсы. В тех случаях, когда снижение тока силового тиристора происходит в результате колебательного процесса в контуре коммутации без применения коммутирующих тиристоров, говорят о *естественной* коммутации.

По скорости замедления тока разряда конденсатора различают системы с мгновенной и замедленной коммутацией. В системах с замедленной коммутацией производные тока ограничиваются индуктивностью коммутирующих реакторов.

При искусственной коммутации к тиристорам предъявляют ряд требований:

иметь минимальные значения времени включения (менее 10 мкс) и выключения (менее 25 мкс); иметь по возможности близкие электрические параметры; выдерживать значительные скорости нарастания тока (более ЮОА/мкс) и напряжения (более 100 В/мкс). Для этой цели лучше всего подходят тиристоры ТЧ (высокочастотные) и ТБ (быстродействующие). Коммутирующие конденсаторы также должны обеспечивать при разряде высокую скорость нарастания тока, большую амплитуду и надежно работать при высокой температуре. Применяя искусственную коммутацию, можно создавать бесконтактные выключатели и переключатели постоянного тока, автономные инверторы, преобразователи частоты в устройствах импульсного регулирования напряжения. В схеме рис. 10.30, а запирание тиристора VS1 обусловлено резонансным характером нагрузки в его цепи. При отпирании тиристора VS1 рабочий ток, проходящий через него, заряжает конденсатор *C* с полярностью, указанной на схеме в скобках. Затем рабочий ток в колебательном контуре, образованном реактором *L* и конденсатором *C*, спадает до нуля. Конденсатор перезаряжается (полярность указана без скобок), его ток изменяет свое направление, тиристор VS1 запирается. Время, в

течение которого тиристор VS1 находится в открытом состоянии, равно половине периода собственных колебаний резонансного контура: $t = \pi\sqrt{LC}$. Нагрузка $R_н$ может быть включена как параллельно конденсатору *C*, так и последовательно с резонансным контуром *LC*. В схеме на рис. 10.30, *б* запирание тиристора VS1 также происходит из-за резонансного изменения направления проходящего через него тока, но это осуществляется с помощью вспомогательного *LC*-контура. До включения тиристора VS1 конденсатор С заряжается (полярность указана в скобках). Когда тиристор VS1 открывается, он шунтирует контур *LC*, конденсатор *C* перезаряжается через реактор *L* и его полярность изменяется на обратную (эта полярность указана без скобок). Во время этого процесса через тиристор VS1 протекают два тока – ток нагрузки и ток перезаряда конденсатора. Вначале эти два тока совпадают по направлению, затем ток разряда конденсатора начинает протекать через тиристор VS1 в направлении, противоположном току нагрузки. Когда суммарный ток падает до нуля и затем изменяет свое направление, тиристор VS1 закрывается. Для увеличения продолжительности открытого состояния тиристора VS1 при искусственной коммутации в таких схемах иногда используют реакторы или автотрансформаторы с нелинейной индуктивностью (с насыщающимися сердечниками, имеющими прямоугольную петлю гистерезиса). Рассмотренные способы коммутации широко используются в автономных инверторах и регуляторах, служащих для частотно-импульсного регулирования напряжения. На схеме рис. 10.30, *в* тиристор VS1 запирается параллельно подключенными конденсатором *C* и тиристором VS2. Переключение тиристоров производится устройством управления, импульсы которого подаются поочередно на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS2. Когда тиристор VS1 открыт, через резистор $R_{н2}$ и конденсатор *C* протекает ток заряда и на конденсаторе устанавливается полярность, указанная в скобках. При отпирании тиристора VS2 конденсатор С разряжается на тиристор VS1 в направлении, противоположном протеканию тока нагрузки, и тиристор VS1 запирается. После закрытия тиристора VS1 конденсатор *C* начинает заряжаться через резистор $R_{нl}$ и приобретает противоположную полярность. При повторном открытии тиристора VS1 происходит перезаряд конденсатора *C*. Он разряжается на тиристор VS2, вследствие чего этот тиристор запирается. Этот способ коммутации тиристоров широко применяется в автономных инверторах. На схеме рис. 10.30, *г* запирание силового тиристора VS1, включенного в цепь нагрузки $R_н$, осуществляется коммутирующим конденсатором *C* или *LC*-контуром, подключаемым к тиристору VS1 коммутирующим тиристором VS2 малой мощности. Перезаряд коммутирующего конденсатора *C* происходит через цепочку, содержащую индуктивность *L* и диод VD1. Предварительно открытием коммутирующего тиристора VS2 конденсатор *C* заряжается через нагрузочный резистор $R_н$ и приобретает полярность, указанную в скобках. Затем открывается силовой тиристор VS1 и происходит перезаряд конденсатора через резонансный контур, образованный конденсатором Cи индуктивностью *L*. Если бы в этот контур не был включен диод VD1, то происходил бы непрерывный процесс заряда и разряда конденсатора, и ток в контуре изменял бы свое значение и направление с резонансной частотой. Однако диод VD1 не позволяет этому току изменять свое направление. Поэтому происходит лишь однократный перезаряд конденсатора *C*, и он приобретает полярность, указанную на схеме без скобок. При повторном включении коммутирующего тиристора VS2 конденсатор *C* разряжается на силовой тиристор VS1, и он закрывается. При этом конденсатор *C* снова перезаряжается через нагрузочный резистор $R_н$ и приобретает первоначальную полярность, т.е. оказывается подготовленным для нового цикла работы. Этот способ коммутации широко применяется в регуляторах, которые служат для широтно-импульсного регулирования напряжения.

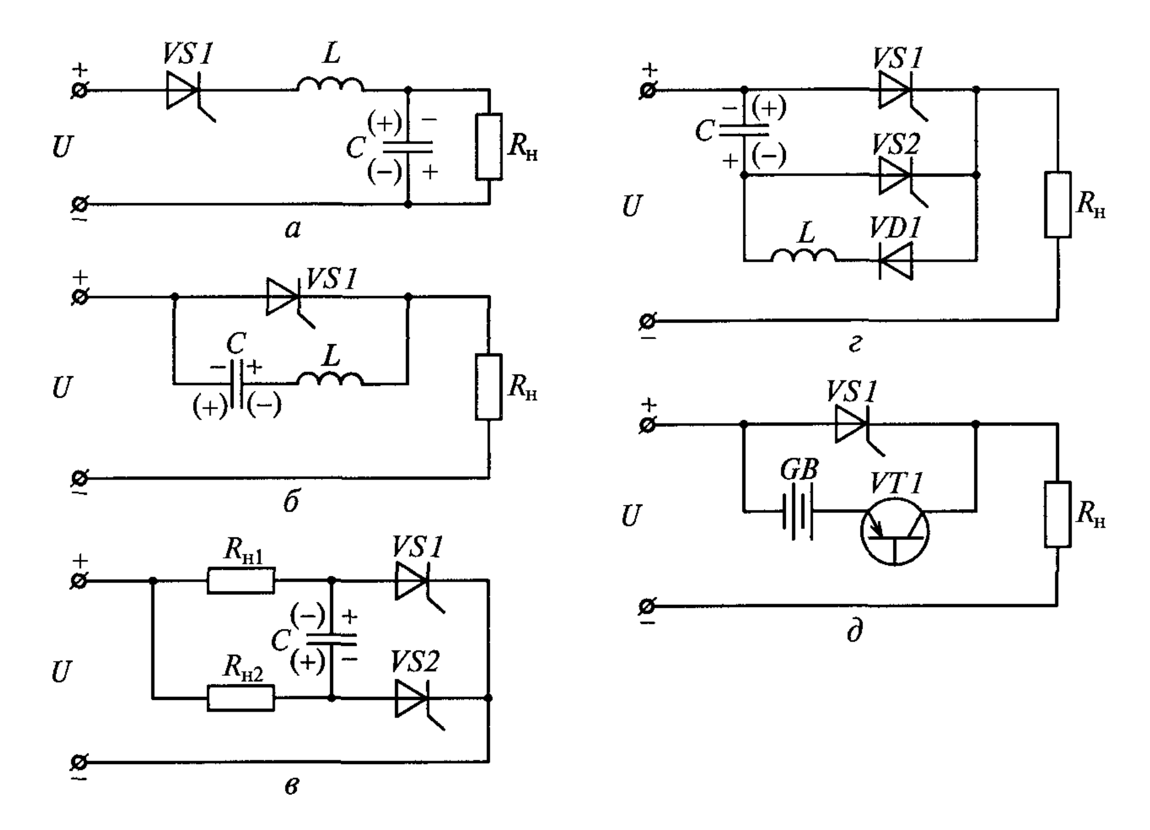



Рис. 10.30. Схемы коммутации тиристоров.
*а* – естественная коммутация; *б* – с помощью дополнительного *LC*-контура;
*в* – с помощью коммутирующего конденсатора *C*,
*г* – с помощью коммутирующего тиристора VS2;
*д* – с помощью дополнительного источника напряжения *GB*

В схеме рис. 10.30, *д* силовой тиристор VS1 запирается импульсами тока, которые подаются от внешнего источника напряжения. В простейшем случае в качестве ключа, подключающего к тиристору VS1 источник обратного напряжения *GB*, может служить транзистор VT1. Можно также подавать импульс обратного тока от внешнего импульсного генератора через трансформатор тока, включенный последовательно с нагрузкой.

Контрольные вопросы

1. Назовите области применения однофазных и трехфазных выпрямителей переменного напряжения.
2. Назовите способы уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.
3. Назовите характерные особенности работы управляемых выпрямителей.
4. В чем состоит принцип работы инверторов тока и напряжения?
5. Назовите особенности групповой работы силовых полупроводниковых приборов.

# Глава 11.
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ.

## 11.1. Тяговые генераторы тепловозов.

Тяговые генераторы тепловозов предназначены для преобразования механической энергии дизеля в электрическую, которая передается тяговым электродвигателям. В момент пуска дизеля тяговые генераторы постоянного тока работают кратковременно в режиме электродвигателя с последовательным возбуждением, приводя во вращение коленчатый вал дизеля. Технические характеристики тяговых генераторов тепловозов постоянного тока приведены в табл. 11.1. На тепловозах тяговый генератор может быть соединен с дизелем одним из двух возможных способов. При первом способе станина генератора жестко

соединена с картером дизеля, а корпус якоря – с коленчатым валом. Кроме того, станина имеет лапы, которыми опирается на поддизельную раму. Вследствие того, что магнитная система и якорь закреплены независимо и жестко, для получения минимальных биений цилиндрической поверхности коллектора по отношению к щеткодержателям вал центрируется в щите сферическим подшипником. Нагрузка на этот роликоподшипник определяется несоосностью якоря и магнитной системы с щеткодержателями. Таким способом соединены тяговые генераторы с дизелями типов Д50, ПД1М на тепловозах серий ТЭМ1, ТЭМ2.

Второй способ предусматривает соединение вала якоря тягового генератора с коленчатым валом дизеля через полужесткую муфту. Станина тягового генератора опирается лапами на поддизельную раму. На тепловозах 2М62 (с дизелем 14Д40), ТЭ40 (с дизелем Д70), ТЭШО (с дизелем 11Д45), ТЭ109, V300, 2ТЭ116, 2ТЭ121 (с дизелем Д49) используется этот способ соединения. Устройство тяговых генераторов постоянного тока различных типов имеет свои особенности, хотя здесь можно выделить и общие технические решения. Наиболее типичным по конструкции является тяговый генератор ГП311Б тепловозов 2ТЭ10 всех модификаций. Основными узлами этого генератора (рис. 11.1) являются якорь, магнитная система, состоящая из станины, главных и добавочных полюсов, подшипниковый щит, траверса со щеткодержателями и торцовый патрубок для подвода охлаждающего воздуха.

*Таблица 11.1. Технические характеристики тяговых генераторов тепловозов*

| Характеристики | Тип тягового генератора | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | МПТ-84/39 | МПТ-120/49 | ГП300Б | ГП311Б | ГП3ПВ | ГП312 |
| Серия тепловоза | ТЭМ1 | ТЭ10, ТЭП10, 2ТЭ10Л | ТЭМ2, ТЭМ2М | 2ТЭ10М, 3ТЭ10М, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В | ТЭП60, 2ТЭП60 | М62, 2М62 |
| Мощность, кВт | 700 | 2000 | 780 | 2000 | 2000 | 1270 |
| Ток продолжительного режима, А | 1200 | 4260 | 1210 | 4320 | 4320 | 3570 |
| Напряжение, В[1] | 900/700 | 700/470 | 870/645 | 700/465 | 635/465 | 570/365 |
| Частота вращения, об/мин | 740 | 850 | 750 | 850 | 750 | 750 |
| Тип обмотки якоря | Петлевая | Лягушачья | Петлевая | Петлевая | Петлевая | Петлевая |
| Число полюсов:<br>главных[2]<br>добавочных | <br>8<br>8 | <br>10<br>10 | <br>8<br>8 | <br>10<br>10 | <br>10<br>10 | <br>10<br>10 |
| Воздушный зазор, мм:<br>под серединой главного полюса<br>под добавочным полюсом | <br>4<br>6,8 | <br>5<br>13 | <br>4<br>8 | <br>5<br>15,5 | <br>5<br>15,5 | <br>5<br>9,5 |
| Число коллекторных пластин | 380 | 465 | 380 | 465 | 465 | 444 |
| Масса, кг | 4500 | 9500 | 5000 | 8900 | 9000 | 7400 |

В числителе указано максимальное напряжение, а в знаменателе – номинальное. Все типы генераторов имеют независимое возбуждение.

**Конструкция якоря.** Якорь тепловозных тяговых генераторов (см. рис. 11.1) изготовляют с укороченным валом 1. Такая конструкция, называемая «*безвальной конструкцией*», позволяет снизить массу тягового генератора и температуру нагревания обмотки, а кроме того, уменьшить трудоемкость изготовления и ремонта. Радиально-осевая система охлаждения якоря, примененная в генераторе ГП311Б, требует свободного подвода воздуха в центральную часть якоря (для входа в радиальные каналы). С этой целью корпус имеет ребристую конструкцию и состоит из сварнолитого барабана 19, к которому приварены два литых фланца. Задний фланец используется для соединения с валом дизеля, а передний – для напрессовки коллектора 4. К барабану корпуса приварены диски продольных ребер 18.

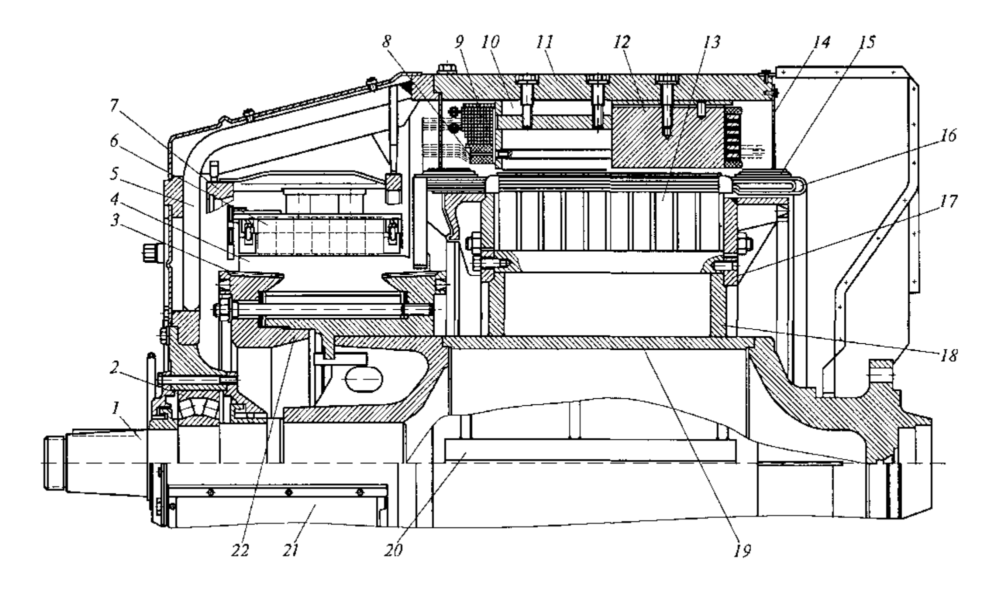



Рис. 11.1. Разрез генератора ГП311Б.
1 – вал; 2 – подшипник; 3 – манжета (изоляция коллектора); 4 – коллекторная пластина; 5 – подшипниковый щит; 6 – щеткодержатель, 7– траверса; 8– пусковая обмотка; 9– обмотка возбуждения; 10– сердечник главного полюса; 11 – станина; 12 – сердечник добавочного полюса; 13 – сердечник якоря; 14 – защитная шайба; 15 – бандаж; 16 – обмотка якоря; 17 – нажимная шайба; 18 – ребро вала якоря; 19 – барабан; 20 – опора станины; 21 – смотровое окно; 22 – нажимная коническая шайба.

Сердечник 13 якоря состоит из пяти штампованных сегментов, которые собирают на продольные шпильки, проходящие через отверстия в сегментах.
Мощные тяговые генераторы ГП311Б, МПТ-120/49, МПТ-120/55А имеют диаметр якоря 1 200 мм. Их сердечники собраны из сегментов, так как наибольший стандартный размер листа электротехнической стали 1000×2000 мм. Собранный и спрессованный сердечник удерживается на корпусе двумя стальными обмоткодержателями, стянутыми шпильками и прикрепленными к корпусу болтами и призонными штифтами. Назначение штифтов – предотвратить смещение обмоткодержателей под действием угловых ускорений при пуске дизеля и работе генератора. Радиальный натяг между сердечником и корпусом якоря создается расклиниванием шпонок при нагретом сердечнике. Каждый лист сердечника якоря имеет 155 пазов. Для создания радиальных каналов сердечник разделяют на пакеты и между ними прокладывают листы с распорками (для вентиляции).
**Конструкция коллектора.** Коллектор генератора ГП311Б (рис. 11.2) относится к арочному типу и собран из 465 трапециевидных пластин 4 повышенной твердости (до 100 НВ). Материалом для них служит твердотянутая коллекторная медь с присадкой серебра от 0,07 до 0,14% или кадмия. Легирующие присадки примерно вдвое увеличивают износостойкость коллектора. В тяговых генераторах мощностью 2000 кВт с большим диаметром якоря (1200 мм) применяют коллекторные пластины с ленточными (гибкими) петушками, изготовленными из медной ленты сечением 2×20 мм. Нижняя часть петушка припаяна твердым припоем к коллекторной пластине, а к верхней части приклепана и припаяна полоска, в которую впаивают припоем ПОС-61 концы катушек обмотки якоря и уравнительные соединения. Между гибкими петушками установлены изолирующие прессованные прокладки для предохранения от замыканий при пайке концов обмотки. В тяговых генераторах меньшей мощности (МПТ-84/39, ГП300Б, МПТ-99/47А) петушки выполнены из коллекторной меди и припаяны к пластинам твердым медно-фосфористым припоем. Для уменьшения массы коллектора и площади боковой поверхности пластин в них сделаны отверстия. Пластины изолированы друг от друга коллекторным миканитом толщиной 1 мм. Используется коллекторный миканит марок КФГ и КФШ толщиной (0,8... 1,2 ± 0,04) мм.

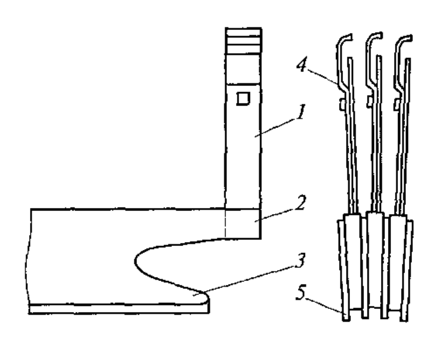



Рис. 11.2. Коллекторная пластина генератора ГП311Б:
1 – петушок; 2 – крепление петушка; 3 – коллекторная пластина; 4 – накладка;
5 – изоляция

В коллекторе арочного типа пластины имеют выточки в форме «ласточкина хвоста», в которые входят конусные части корпуса якоря с одной стороны и нажимной шайбы 22 (см. рис. 11.1) с другой. Пластины стянуты этими стальными конусами и шпильками из легированной стали марки 12ХН2, термически обработанными для достижения высокой прочности и вязкости. От корпуса они изолированы манжетами 3 толщиной 2 мм из формовочного миканита марок ФМГ и ФФГА на термореактивной глифталевой смоле. Выступающую часть манжеты предохраняют от повреждения бандажом и покрывают, как и торцовые части пластин, изоляционной эмалью. Чтобы внутренние части коллектора не увлажнялись, места посадки нажимной шайбы на корпус коллектора уплотняют (герметизируют) с помощью пропитанного шнура и снаружи промазывают стык густыми цинковыми белилами. Диаметр коллектора 850 мм, длина рабочей части 370 мм.

**Устройство обмотки якоря.** Чтобы получить большее число параллельных ветвей без увеличения числа полюсов применена многоходовая петлевая обмотка. Сложные якорные обмотки выполняют в тяговых генераторах, предназначенных для тепловозных дизелей большой мощности, работающих при сравнительно высокой частоте вращения. Тяговые генераторы мощностью 1350 кВт и выше выполняют с двухходовой петлевой или лягушечьей обмоткой якоря (генераторы МПТ-99/47А). Первые выпуски генераторов ГП311Б также имели двухходовую лягушечью обмотку, состоящую из двухходовой петлевой обмотки и волновой обмотки, уложенной в пазы 1 – 17. Секция волновой обмотки соединена с пластинами 1 и 92, а петлевой – с пластинами 44 и 46. Секции петлевой и волновой обмоток присоединяют к одним и тем же петушкам коллектора. Секции волновой обмотки, помимо своих основных функций, выполняют роль уравнительных соединений для петлевой обмотки и наоборот. В каждом пазу якоря уложены 12 проводников 4 из шинной меди размером 2,83×5,5 мм (рис. 11.3). Катушка состоит из трех элементарных одновитковых секций и изолируется на полное рабочее напряжение. В прорезь петушка коллектора впаивают четыре проводника, расположенных по вертикали. Каждый проводник изолирован одним слоем микаленты (вполнахлеста) ЛФЧ1 толщиной 0,1 мм. Три проводника полукатушки изолированы тремя слоями микаленты толщиной 0,13 мм (вполнахлеста) и скреплены одним слоем встык стеклянной ленты толщиной 0,1 мм. В лобовых частях катушек проводники изолированы одним слоем микаленты вполнахлеста, а между слоями обмотки кладут миканитовую изоляцию толщиной не менее 1 мм. Концы пазов якоря дополнительно изолированы картоном и миканитом. На дно паза уложена миканитовая прокладка 8. Для защиты изоляции от загрязнения охлаждающим воздухом, который непосредственно омывает части катушки и проходит через радиальные вентиляционные каналы сердечника, катушку дополнительно изолируют коробочкой из электрокартона толщиной 0,3 мм.

Тяговые генераторы ГП311Б выпуска 1971 г. и позднее имеют петлевую ступенчатую двухходовую несимметричную обмотку якоря с полным числом уравнительных соединений первого рода, уложенных со стороны коллектора. Эти генераторы работают более устойчиво,

чем тяговые генераторы с лягушечьей обмоткой. Кроме того, ступенчатая двухходовая обмотка позволяет применять стеклобандаж для крепления лобовых частей без ухудшения коммутации. Опыт эксплуатации показал, что использование стеклобандажей на якорях повышает надежность работы тяговых генераторов (см. рис. 11.1). Несимметричная двухходовая обмотка якоря позволяет разместить уравнительные соединения на одной стороне якоря. Однако для этого необходимо, чтобы $u$, а также отношения $z/p$ и $k/p$ являлись нечетными числами, где $z$ – число пазов якоря; $p$ – число пар полюсов; $k$ – число коллекторных пластин; $u$ – число коллекторных пластин на паз. Получается совокупность двух отдельных обмоток, совмещенных на якоре и работающих параллельно.

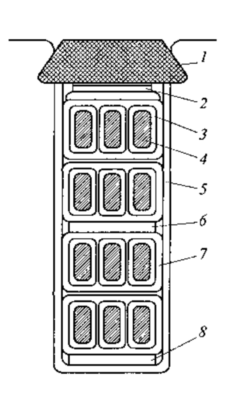



Рис. 11.3. Разрез паза якоря генератора ГП311Б:
1 – клин; 2 – прокладка под клин; 3 – изоляция проводников; 4 – проводник обмотки;
5 – защитная изоляция; 6 – прокладка между секциями; 7 – корпусная изоляция;
8 – прокладка на дно паза.

Число щеток равно числу полюсов, но при этом ширина каждой щетки такова, что одновременно могут работать две обмотки. Двухходовая несимметричная ступенчатая (одна из секций в каждом пазу имеет увеличенный на единицу шаг по пазам) петлевая обмотка уложена в пазы 1 и 16, 1 и 17. Катушка петлевой двухходовой обмотки состоит из трех элементарных одновитковых секций, выполненных из провода ПЭТВСД сечением 2,8×6,3 мм. Изоляция катушки якорной обмотки от корпуса выполнена тремя слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСПЭ-934-ТП и одним слоем стеклянной ленты ЛЭС (вполнахлеста). Кроме того, паз выстилается пленочной стеклотканью. Уравнительные соединения выполнены из меди ПММ сечением 1,32×6,3 мм. Каждый их пяти проводников изолирован одним слоем слюдинитовой ленты ЛС (вполнахлеста), а все вместе – изолированы стеклянной лентой ЛСЭ, пропитанной лаком КО-916К. Крепление лобовых частей обмотки осуществляется бандажами из стеклобандажной ленты, пропитанной термореактивным лаком. Ленту накладывают с силой натяжения до 400 кН. Величина натяжения и режим термообработки (запечки) ленты после наложения контролируются автоматически с целью получения монолитного высокопрочного бандажа. Обмотка якоря имеет изоляцию класса В.

**Устройство щеткодержателей.** Чтобы не допускать вибрации и смещения щеткодержателей, щит 5 (см. рис. 11.1) выполняют в виде сварной конструкции, состоящей из ребер и колец. Ребра наклонены к оси машины, что обеспечивает жесткость и легкость конструкции. В центральной части щита установлена и закреплена болтами съемная ступица. Такая конструкция позволяет заменить подшипник без снятия тягового генератора с тепловоза и его разборки. На щите размещена поворотная траверса в виде сварного кольца с посадочным и зубчатым венцами и десятью U-образными накладками. К этим накладкам прикрепляются через изоляторы дюралюминиевые бракеты (кронштейны). На каждом бракете укреплено по девять щеткодержателей со щетками и токособирательные шины. Траверсу фиксируют в положении, соответствующем нейтрали, с помощью стопорных болтов. При обслуживании нижних щеток и щеткодержателей траверсу поворачивают

вручную с помощью шестерни. В некоторых тяговых генераторах подшипниковые щиты не имеют поворотной траверсы. В этом случае щиты снабжены овальными отверстиями под болты крепления, позволяющими поворачивать щит, для расположения щеток на геометрической нейтрали. Задний сварной патрубок (щит) защищает тяговый генератор от загрязнения. Для присоединения напорного воздухопровода он имеет два люка. На более ранних тяговых генераторах применяли щеткодержатели наклонного (реактивного) типа. С 1979 г. на тяговых генераторах ГП311Б устанавливают радиальные щеткодержатели с постоянным давлением на щетку. Корпус щеткодержателя наклонного типа отлит из кремнистой латуни и имеет две прорези: с наклоном 30° к радиусу коллектора (для набегающей щетки) и 10° (для сбегающей щетки). Усилие нажатия на щетки марки ЭГ-74 осуществляется спиральными пружинами через курки. Сила нажатия на щетку регулируется изменением затяжки пружины путем перестановки ее конца с одного зубца храповика на другой и устанавливается в пределах 8...12 Н. Щетки армированы токоведущим проводом (медным шунтом). Армирование уменьшает нагрев щетки, особенно в верхней части, повышает стабильность протекания тока между щеткой и коллектором, улучшает коммутацию. На тяговых генераторах устанавливают в основном армированные щетки с открытыми наконечниками, которые прикрепляются винтами к бракету. Положение щеткодержателей относительно поверхности коллектора в корпусе щеткодержателя регулируют прорезью под болтом. Расстояние от коллектора до щеткодержателя составляет 2...3 мм. Бракеты расположены так, что оси щеткодержателей находятся на нейтрали. Чтобы обеспечить надежность крепления щеткодержателей, точность размещения щеток и стабильность нажатия на них, привалочные поверхности щеткодержателя и бракета выполняют гребенчатыми (рифлеными) и, кроме того, применяют ленточные рулонные пружины. Корпус щеткодержателя имеет гнездо, в которое устанавливается разрезная щетка с резиновым амортизатором (накладкой) толщиной 12 мм. В амортизаторе выполнены четыре отверстия для токоведущих проводов и прямоугольный выступ, входящий в соответствующий паз на верхнем торце щетки. Амортизаторы увеличивают срок службы щеток, улучшают коммутацию и предупреждают отколы щеток. Использование радиальных щеткодержателей на генераторах ГП311Б позволяет уменьшить количество щеток в 2 раза.

**Магнитная система.** На станине тягового генератора расположены главные и добавочные полюса с катушками, составляющие его магнитную систему. При диаметре якоря 1000 – 1200 мм. тяговые генераторы имеют число пар полюсов $2p = 10$ или 12.

*Станина* представляет собой кольцевой магнитопровод, изготовленный из толстолистового стального проката гибкой (в холодном состоянии) и сваркой, с двумя приваренными лапами, которыми она опирается на поддизельную раму. *Сердечник главных полюсов* набирают из листов холоднокатаной электротехнической стали 3411 толщиной 1 мм. Листы покрыты лаком, спрессованы под давлением 29 МПа и стянуты заклепками. В каждом листе сердечника выштамповано прямоугольное отверстие, куда закладывается стальной стержень с резьбовыми отверстиями для крепления полюса к станине. На сердечниках главных полюсов размещены катушки обмоток независимого возбуждения 5 и пусковой 2 (рис. 11.4). Катушки намотаны на каркас, выполненный из листовой стали толщиной 1 мм. Каркас имеет прокладки 7 и 3 – удерживающие рамки, изготовленные из прочной и теплостойкой пластмассы. На каркас наложена изоляция 4 из четырех слоев гибкого стекломиканита на кремнийорганическом лаке и одного слоя стеклоленты. Пусковая обмотка 2 выполнена в виде отдельной шайбы и расположена у полюсного башмака. Поверх нее установлена стеклотекстолитовая изоляционная шайба, выше которой намотана обмотка независимого возбуждения.

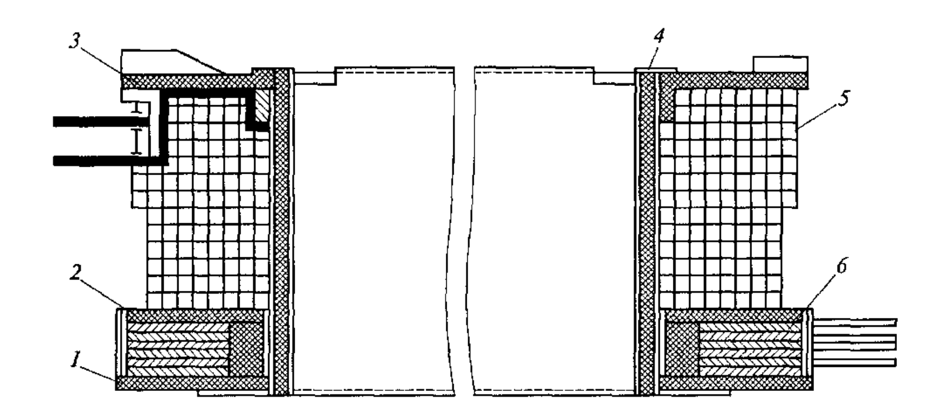



Рис. 11.4. Катушка главного полюса генератора ГП311Б:
1, 3 – прокладки, 2 – пусковая обмотка, 4 – корпусная изоляция,
5 – обмотка возбуждения, 6 – выводы пусковой обмотки.

Такое расположение катушек обеспечивает хороший отвод теплоты. В процессе намотки каждый слой катушки независимого возбуждения промазывают кремнийорганическим лаком К-47К или компаундом К-54. Пустоты заполняют замазкой П-11. Готовую катушку пропитывают в лаке К-47К, запекают и покрывают эмалью ГФ-92. Из десяти главных полюсов генератора пять имеют перекрещенные выводы, а пять – открытые. Это сделано для чередования полярности полюсов и упрощения конструкции соединительных шин. В генераторах ГП300Б (ТЭМ2), МПТ-84/39 (ТЭМ1) и других обмотку независимого возбуждения и пусковую наматывают на общий каркас. Пусковую обмотку наматывают из широкой медной полосы непосредственно на изолированный каркас, а обмотку независимого возбуждения – на пусковую. Между катушками укладывают миканитовую изоляцию.

*Сердечник добавочных полюсов* изготавливают из толстолистовой стали Ст3 (рис. 11.5). Он сужен в части, обращенной к якорю. К нижней части сердечника приклепаны латунные или дюралюминиевые угольники 5. Катушка опирается на эти угольники и фиксируется накладкой и пружиной. Сердечник 6 полюса изолирован от катушки спрессованным и спеченным миканитом или стеклотканью на эпоксидной смоле.

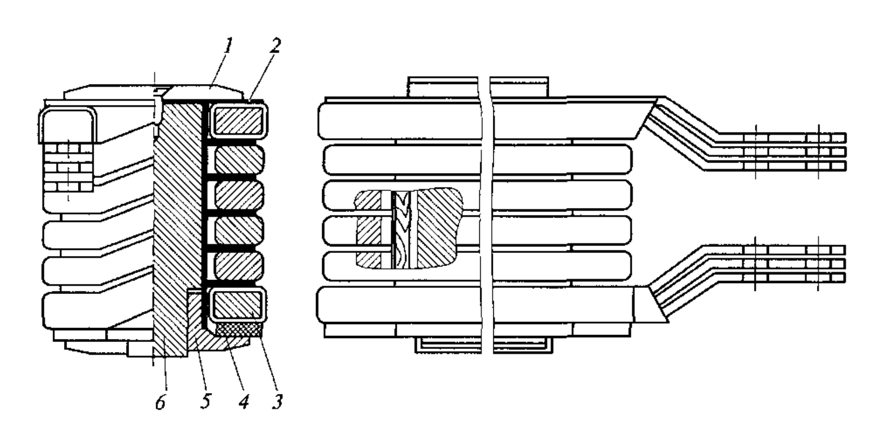



Рис. 11.5. Добавочный полюс генератора ГП311Б.
1 – башмак, 2 – изоляционная прокладка; 3 – проводник; 4 – изоляция;
5 – угольник; 6 – сердечник.

Катушка добавочного полюса состоит из шести витков шинной меди в качестве проводника 3. Крайние витки изолированы двумя слоями микаленты и одним слоем стеклоленты 2. Между витками уложены стеклотекстолитовые прокладки толщиной 2 мм. Готовую катушку покрывают эмалью ГФ-92. Между угольником 5 и полюсом помещена немагнитная прокладка, создающая второй воздушный зазор. Полюс в сборе пропитывают в

термореактивном лаке и запекают. Для предотвращения перемещения катушки на сердечнике из-за усыхания изоляции и других деформаций укладывают пружинную рамку из ленточной стали. Между сердечником полюса и станиной помещен набор из шести стальных прокладок общей толщиной 3 мм, служащих для регулирования зазора под добавочным полюсом при настройке коммутации.

## 11.2. Генераторы пассажирских вагонов.

На пассажирских вагонах постройки ГДР, ПНР и ВНР установлены генераторы постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением. На вагонах без кондиционирования воздуха постройки ГДР применяются генераторы типа 23/07.11 или его модификации 23/07.15, 23/07.17, 23/07.19 и 23/07.21, а на вагонах постройки ПНР – однотипный с ним генератор PW-114a. На вагонах с кондиционированием воздуха используются генераторы DUGG-28B и K694L. Основные технические характеристики этих генераторов приведены в табл. 11.2. Ток нагрузки генератора $I_н$, а следовательно, и ток в обмотке якоря $I_я$ определяются мощностью подключенных к генератору потребителей и током заряда аккумуляторной батареи. Ток обмотки возбуждения $I_в$ зависит от работы регулятора напряжения РНГ, который изменяет его так, чтобы обеспечить стабилизацию напряжения генератора. Генераторы типа 23/07 и однотипный с ними генератор PW-114a представляют собой четырехполюсные машины закрытого исполнения с литой станиной 1 (рис. 11.6). В верхней ее части имеются лапы для крепления генератора к раме тележки. Сердечники полюсов 11 собраны из листовой электротехнической стали и прикреплены к станине болтами. Листы изолированы между собой для уменьшения вихревых токов при работе машины. На полюсах имеются катушки обмотки возбуждения 9. Подшипниковый щит 2, установленный со стороны коллектора, закрыт съемным ленточным кожухом, который позволяет осматривать коллектор 8 и щеточный аппарат 6. Якорь генератора выполнен из изолированных листов электротехнической стали, собранных в сердечник 10, напрессованный на вал 15. Обмотка якоря волновая ступенчатая, выполнена из якорных катушек, состоящих из одновитковых секций. Якорные катушки уложены в пазы сердечника якоря в два слоя. Ступенчатая обмотка, при которой одна из секций каждой якорной катушки уложена в соседнем пазу, улучшает коммутацию. Со стороны, противоположной коллектору, на валу якоря установлена муфта для соединения генератора с редукторно-карданным приводом. Щеточная траверса 5 установлена на подшипниковом щите 2 и может свободно поворачиваться на его втулке на 90°, (поворот ее ограничивается упорными болтами). При изменении направления вращения якоря траверса под действием силы трения щеток о коллектор поворачивается на 90°, и щетки изменяют свое положение относительно полюсов (смещаются на одно полюсное деление). Вследствие этого полярность щеток остается неизменной. В генераторе смонтировано четыре щеткодержателя 6, в каждом из которых установлено по одной щетке марки ЭГ-14. Противолежащие щеткодержатели соединены между собой попарно, и провода от них подходят к выводным зажимам. Пружины, смонтированные в щеткодержателях, обеспечивают требуемое давление щеток на коллектор. Генератор 23/07.11 отличается от генератора 23/07.21 конструкцией станины и элементами крепления. Этот генератор подвешен на раме тележки и приводится во вращение с помощью ременного привода. Для этого на его валу установлен шкив, а в верхней части станины прикреплена литая коробка, на которой смонтирован вал для подвески генератора к раме вагона и пружина для натяжения ремня.

*Таблица 11.2. Технические характеристики генераторов пассажирских вагонов*

| Тип генератора | Номинальная мощность, кВт | Частота вращения, об/мин | Рабочее напряжение, В | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|
| 23/07.21 | 4,9 | 550...2 900 | 53...65 | 185 |
| 23/07.11 | 4,5 | 650...2400 | 53...65 | 185 |
| PW-114a | 4,55 | 650...2 600 | 53 ..65 | 185 |
| DUGG-28B | 28 | 600...3 000 | 110...138 | 1200 |
| K694L | 21,5 | 600...3 000 | 110...135 | 1000 |

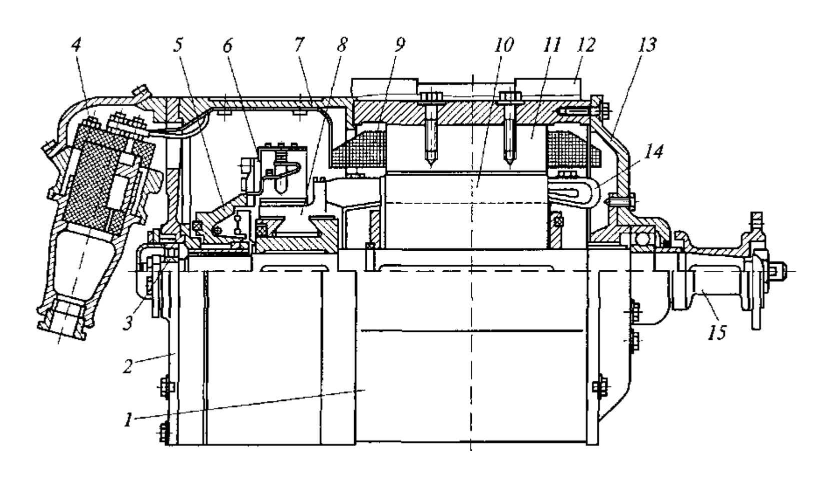



Рис. 11.6. Генератор пассажирского вагона типа 23/07.
1 – станина; 2, 13 – подшипниковые щиты; 3 – подшипник;
4 – кабельная коробка; 5 – траверса; 6– щеткодержатель; 7 – вентиляционная решетка;
8 – коллектор; 9 – обмотка возбуждения; 10 – сердечник якоря;
11 – сердечник полюса; 12 – лапа; 14 – обмотка якоря; 15 – вал.

### 11.3. Тяговые электродвигатели тепловозов.

Тепловозы с электрической передачей имеют индивидуальный привод колесных пар. На тепловозах, электровозах и электропоездах применяют тяговые двигатели с последовательным возбуждением. Их узлы и элементы во многом подобны. Все двигатели постоянного тока имеют независимую воздушную систему охлаждения нагнетательного осевого типа с подачей воздуха со стороны коллектора. Тяговые электродвигатели грузовых тепловозов и электровозов выполняют в большинстве случаев с опорно-осевой подвеской, и только двигатели пассажирских электровозов ЧС2, ЧС4, ЧС6, ЧС8, ЭП1, пассажирских тепловозов ТЭП60, ТЭП70, ТЭП75, ТЭП80, 2ТЭ121 и электропоездов имеют опорно-рамную подвеску.

**Конструкция электродвигателя ЭД118Б.** По конструкции все тяговые электродвигатели тепловозов одинаковы. С 1975 г. на тепловозах мощностью 2210 кВт устанавливаются двигатели ЭД118Б (рис. 11.7) и осваиваемый ЭД125Б. Технические характеристики тяговых электродвигателей тепловозов представлены в табл. 11.3. Станины машин с 2р = 4 обычно

восьмигранные с широкими горизонтальными и вертикальными гранями, в которых располагаются главные полюса. В узких гранях, ориентированных под 45° к горизонтали и вертикали, размещают добавочные полюса. Двигатели с $2p = 6$ имеют цилиндрические станины. В торцовых частях станина имеет расточки (горловины) для посадки подшипниковых щитов. Станина имеет два опорных прилива («носика»), предназначенных для закрепления электродвигателя на тележке тепловоза. На корпусе имеются также приливы с резьбой (бонки) для крепления кожуха зубчатой передачи. К торцовой стенке корпуса со стороны коллектора приварены кронштейны для крепления щеткодержателей 10. В верхней части станины со стороны коллектора имеется вентиляционное отверстие, соединенное брезентовой гармошкой (рукавом) с каналом, через который нагнетается воздух для охлаждения электродвигателей. Выход воздуха осуществляется с противоположной стороны через три отверстия в корпусе двигателя, защищенных сетками и щитками. Кабельные выводы крепятся к станине зажимами из древесно-слоистого пластика, называемыми *клицами*. Якорь опирается на два роликовых подшипника 5 (8Н9241711М) и 27 (8Н32330М), установленных в стальных подшипниковых щитах: малом 6 (со стороны коллектора 8) и большом 25 (со стороны шестерни).

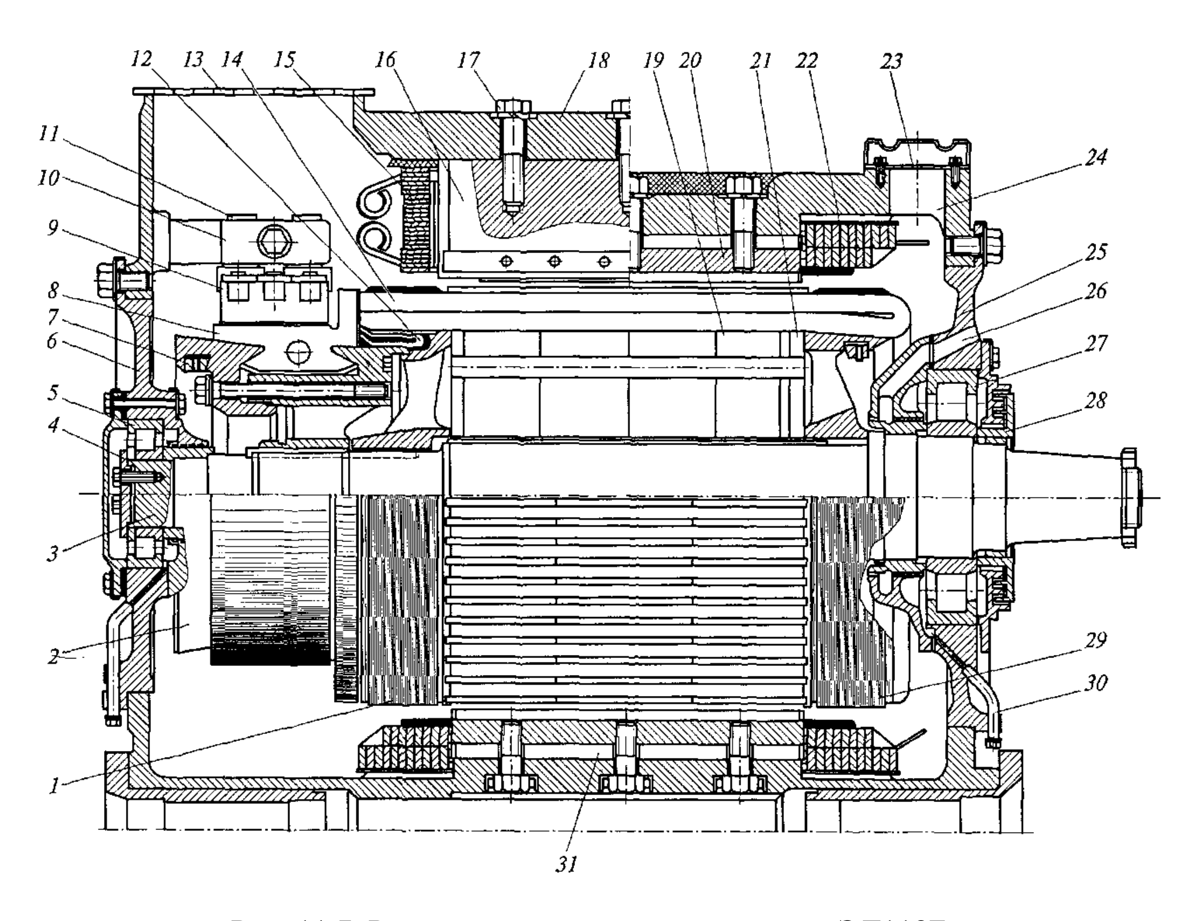



Рис. 11.7. Разрез тягового электродвигателя ЭД118Б.
1 – передний бандаж; 2 – коническая нажимная шайба; 3 – вал, 4 – нажимная шайба подшипника; 5, 27 – подшипники; 6, 25 – подшипниковые щиты;
7 – балансировочный груз; 8 – коллектор; 9 – щетка; 10 – щеткодержатель;
11 – изолятор; 12 – уравнительные соединения; 13 – сетка; 14 – обмотка якоря;
15– обмотка добавочных полюсов; 16 – сердечник добавочных полюсов; 17 – болт;
18 – станина; 19 – сердечник якоря; 20 – стальная пластина; 21 – щека;
22 – обмотка возбуждения; 23 – сетка; 24 – канал для выхода воздуха;
26 – атмосферный канал; 28 – лабиринтная шайба; 29 – задний бандаж;
30 – смазочный канал; 31 – сердечник главного полюса.

Выточки в щитах под роликовые подшипники и посадочные поверхности щитов должны быть строго концентричны. Биение этих поверхностей допускается не более 0,1 мм. С внутренней стороны подшипникового щита расположено кольцо с лабиринтными канавками. В подшипниковом щите 6 со стороны коллектора 8 установлен опорно-упорный подшипник 5, наружное кольцо которого имеет буртики с двух сторон, а внутреннее – только с одной. К торцу вала 3 якоря шайбой и болтами прикреплено упорное кольцо. Подшипник воспринимает усилия, направленные вдоль вала якоря. Продольный разбег якоря составляет 0,08...0,5 мм. В подшипниковом щите 25 со стороны шестерни, находится опорный подшипник 27, внутреннее кольцо которого насажено на вал 3 якоря, вслед за лабиринтным кольцом. Крышка подшипника имеет снаружи лабиринтные канавки, в которые входят выступы посаженной на вал лабиринтной шайбы 28. Она предотвращает вытекание смазки из подшипника. Для предохранения от проникновения смазки внутрь двигателя служит воздушный канал (дренажное отверстие) в щите с комбинированными уплотнениями.

*Таблица 11.3. Технические характеристики тяговых электродвигателей тепловозов*

| Характеристики | Тип тягового двигателя | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ЭДТ200Б | ЭДТ104 | ЭД118АТ | ЭД118Б | ЭД120А | ЭД121 |
| Серия тепловоза | ТЭМ1 | ТЭ10, ТЭП10, 2ТЭ10Л | ТЭМ2, ТЭМ2М, М62, 2М62 | 2ТЭ116, 2ТЭ116А, 2ТЭ10, ТЭП60 | ТЭМ7 | ТЭП70 |
| Мощность, кВт | 152 | 307 | 257 | 305 | 135 | 413 |
| Ток продолжительного режима, А | 725 | 710 | 650 | 720 | 800 | 830 |
| Напряжение, В | 235 | 470 | 435 | 463 | 205 | 542 |
| Частота вращения, об/мин: длительная<br>максимальная | 425<br>2200 | 605<br>2480 | 247<br>1300 | 585<br>2290 | 245<br>1890 | 704<br>2320 |
| Передаточное отношение | 4,69 | 4,93 | 4,41 | 4,41 | 4,41 | 3,12 |
| Воздушный зазор, мм: под серединой главного<br>полюса под дополнительным полюсом | 2,75<br>4 | 4,50<br>8,0 | 7,0<br>10 | 7,0<br>10 | 7,0<br>10 | 7,0<br>10 |
| Число коллекторных пластин | 150 | 232 | 216 | 216 | 216 | 216 |
| Масса, кг | 2550 | 2850 | 3100 | 3100 | 3000 | 2950 |

**Конструкция электродвигателя ЭД126.** *Станина* тягового электродвигателя ЭД126 тепловоза 2ТЭ121 представляет собой сварной цилиндр, к которому крепятся шесть главных и шесть добавочных полюсов. Тяговые электродвигатели являются реверсивными, и частота вращения вала при вращении в разные стороны при одной и той же нагрузке не должна отличаться более чем на 4% (ГОСТ 2582– 81). Этим обусловлены жесткие требования к установке щеток по нейтрали. Допуск на расположение кронштейнов щеткодержателей после приварки их к корпусу составляет ±0,5 мм.

*Главные полюса* (рис. 11.8) имеют сердечники 3, набранные из штампованных листов малоуглеродистой стали Ст2 толщиной 2 мм. Листы сердечников спрессованы и стянуты четырьмя заклепками с потайными головками. Для возможности утопления головок заклепок и равномерного распределения усилия крайние листы изготовлены более толстыми. В середине каждого листа сердечника выштамповано отверстие, куда после сборки запрессовывают стальной стержень. Сердечник крепится к станине тремя болтами, ввернутыми в стержень. При этом стягивающее усилие от стержня равномерно передается на листы сердечника. Головки болтов заливают кварцкомпаундом, препятствующим просачиванию влаги внутрь станины. Катушка главного полюса намотана из шинной меди на широкое ребро (плашмя) в два слоя. Витки катушки изолированы друг от друга асбестовой электроизоляционной бумагой 10. Катушка состоит из двух полукатушек с числом витков 11

и 8, соединенных между собой последовательно. Такая конструкция обеспечивает лучшее заполнение межкатушечного пространства и определяется условиями размещения главных полюсов. Наружная изоляция катушки (корпусная изоляция) 12 имеет четыре слоя ленты ЛСКН-160-ТТ и по одному слою стеклянной ленты и электроизоляционной пленки. В местах соприкосновения катушки со станиной 4 дополнительно устанавливают прокладки <5 из стеклоткани и стеклотекстолита СТЭФ-1-0,5. Между слоями катушки также укладывают межкатушечную изоляцию 8 из стеклотекстолита. Каждый слой изоляции промазан компаундом. Катушку с изоляцией спрессовывают и запекают, а затем покрывают эмалью. По другой технологии витковая изоляция катушек главных полюсов выполнена из асбестовой бумаги, слои катушки изолированы один от другого стеклотекстолитовой прокладкой. Для обеспечения закрепления катушки на сердечнике зазоры между ними заполняют асбестовой лентой ЛАЭ и затем пропитывают в компаунде «Монолит-2». Изоляция класса F.

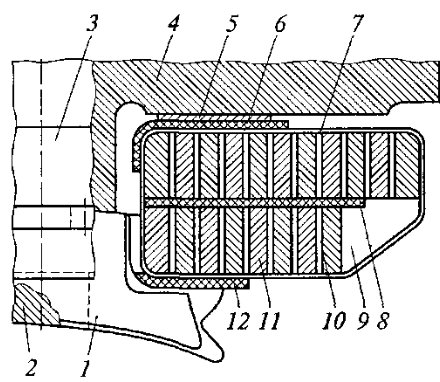



Рис. 11.8. Разрез главного полюса тягового электродвигателя ЭД126.
1 – башмак; 2 – сердечник полюса; 3– крепление сердечника полюса; 4 – станина;
5 – пружинная рамка; 6 – прокладка; 7– изоляция катушки;
8 – межкатушечная изоляция; 9– компаундная заливка;
10 – асбестовая электроизоляционная бумага; 11 – проводник; 12 – корпусная изоляция.

Две катушки главных полюсов имеют открытые, а две – перекрещенные выводы. Между катушкой и станиной установлена стальная прокладка толщиной 1 мм для предохранения изоляции катушки от грубо обработанной поверхности станины. Со временем высота катушки уменьшается вследствие усыхания изоляции. Поэтому чтобы предупредить перемещение катушки по сердечнику при ударах и вибрациях, между катушкой и башмаком полюса прокладывают рамку 5, создающую после затяжки болтов давление на катушку. Во избежание повреждения изоляции катушка отделена от башмака предохранительной рамкой из тонколистовой стали.

*Добавочные полюса* состоят из сердечников и катушек (см. рис. 11.7). Воздушный зазор под добавочными полюсами равен 9 мм. Сердечники добавочных полюсов изготовляются сплошными из толстолистовой литой или прокатанной стали Ст3, так как их размеры и поток, проходящий через них, невелики, и потери, вызываемые вихревыми токами, также незначительны.

Башмак сердечника уже, чем основное его тело, поэтому для удержания катушки с двух сторон башмака приклепаны немагнитные полюсные наконечники из латуни или дюралюминия. Для надежности крепления полюсные наконечники посажены на угольник (см. рис. 11.5). Чтобы предупредить перемещение катушки вдоль сердечника (при усыхании изоляции), между ней и станиной установлена пружинная рамка. Между сердечником и станиной поставлены дюралюминиевые немагнитные прокладки, увеличивающие воздушный зазор в магнитной цепи, для уменьшения рассеивания магнитного потока и снижения влияния вихревых токов на коммутацию. Катушка добавочного полюса выполнена из шинной меди, намотанной на узкое ребро. Между витками катушки установлены

прокладки из асбестовой электроизоляционной бумаги. Полностью изолируют от корпуса только три-четыре витка: с каждой стороны двумя-тремя слоями ленты Л С (вполнахлеста) и стеклянной лентой ЛЭС. Со стороны станины и наконечника располагают прокладки из стеклотекстолита. Для повышения теплоотдачи наружную поверхность средних витков катушки не изолируют, а от корпуса изолируют их пятью прокладками из асбестовой электроизоляционной бумаги. Класс изоляции F. Катушка надета на стальной каркас. Для изоляции от корпуса ее вместе с каркасом пропитывают в компаунде и затем покрывают электроизоляционной эмалью. Межкатушечные соединения, выполненные шинами или гибкими кабелями, при неудовлетворительном креплении вибрируют, что приводит к изломам как самих соединений, так и выводов катушек. Поэтому предпочтение отдают шинным межкатушечным соединениям, выполненным из двух голых медных лент и прикрепленных к корпусу бандажом с резиновыми прокладками, гасящими высокочастотные вибрации. Сердечник якоря набран из штампованных листов электротехнической легированной стали марок 2211, 2212 (толщиной 0,5 мм), покрытых тонким слоем лака с обеих сторон. Листы набираются по массе (363 кг). Толщина крайних листов составляет 1 мм. В каждом листе выштамповано 54 паза и два ряда вентиляционных отверстий (32 шт.) диаметром 27 мм. Середина каждого паза совпадает с серединой коллекторной пластины. Нажимные шайбы, одновременно являющиеся обмоткодержателями, отлиты из стали. Со стороны шестерни на валу установлена задняя шайба (открытого типа), со стороны коллектора –- передняя. Открытая шайба улучшает охлаждение задних лобовых частей обмотки. Собранный сердечник без обмотки покрывают эмалью (коричневым грунтом) ФЛ-03К и запекают. Нажимные шайбы перед укладкой обмотки якоря покрывают стеклотканью, пропитанной в эпоксидном лаке, опрессовывают и запекают. Это создает монолитный слой изоляции.

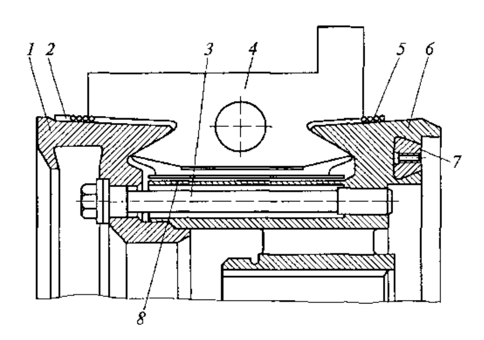



Рис. 11.9. Коллектор тягового электродвигателя ЭД126:
7, 6 – нажимные шайбы, 2, 5 – миканитовые манжеты, 3 – стяжной болт,
4 – коллекторная пластина, 7 – балансировочный груз, 8 – изоляционная втулка.

Коллектор имеет диаметр 400 мм (рис. 11.9). Пластины 4 коллектора (их всего 216 шт.) изготовлены из твердотянутой профильной меди, легированной кадмием или серебром. Пластины штампуют как единое целое с петушками. В нижней части они имеют форму ласточкина хвоста, позволяющего прочно скрепить коллектор. Втулка 8 и нажимная коническая шайба коллектора, конусные выступы которых входят в выточки пластин, сжаты под прессом и стянуты двенадцатью болтами 3. Пластины изолированы друг от друга коллекторным миканитом КФШ толщиной 1,2 мм, а от корпуса – миканитовыми втулкой 8 и манжетами 2 и 5 марки ФФГА толщиной 2 мм. Выступающий конец миканитовой манжеты защищен от внешних воздействий бандажом из стеклянной ленты, покрытым сверху эмалью. Каждая четвертая пластина имеет более глубокую прорезь, в которую дополнительно впаивают концы уравнительных соединений.

Якорь электродвигателей имеет петлевую обмотку с уравнительными соединениями первого рода. Она состоит из 54 катушек и имеет изоляцию класса F. Шаг обмотки якоря по пазам: $y_1$ = 1–14, а шаг по коллектору $y_k$ = 1–2. Катушка обмотки якоря состоит из четырех

элементарных одновитковых секций, расположенных по ширине паза (горизонтальная укладка). Каждая секция в свою очередь состоит из трех параллельных проводников, расположенных по высоте паза. Это делается с целью уменьшения потерь от вихревых токов, наводимых потоком рассеяния. В пазах катушка изолирована тремя слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСЭП толщиной 0,1 мм вполнахлеста и одним слоем стеклоленты ЛЭС толщиной 0,1 мм вполнахлеста. Каждый проводник покрывается изоляцией из одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм. В задних лобовых частях между элементарными секциями дополнительно устанавливают прокладки из стеклоленты. Передние лобовые части дополнительно имеют между витками секции прокладки из слюды, чтобы избежать витковых замыканий при осадке и бандажировке обмотки. Концы катушек в изгибах дополнительно изолируются одним слоем полиамидной пленки ПМА толщиной 0,04 мм. На дно паза и под клин устанавливают прокладки из стеклотекстолита толщиной 0,35 мм. Обмотка якоря удерживается в пазах стеклотекстолитовыми клиньями толщиной 6 мм, а в лобовых частях – стеклобандажами.
**Особенности конструкции других электродвигателей**. В электродвигателе ЭД118А применяют стеклобандаж, который наматывается с натяжением 1,3 кН. Стеклобандаж изготовляют из стеклоленты ЛСБ-F размером 0,2×20 мм (стеклянные волокна расположены только в продольном направлении и склеены эпоксидным связующим компаундом). Бандажи в процессе сушки запекают, и они становятся монолитными. Преимущество стеклобандажа в том, что он не разрушается при круговом огне на коллекторе. Под передними лобовыми частями обмотки якоря находятся уравнительные соединения, выполненные из меди МГМ размером 1,68×5,1 мм (с изоляцией 2,23×6,87 мм). Выводы уравнительных соединений присоединяют к коллекторным пластинам 1 и 109, 5 и 113.
Для крепления балансировочных грузов в конусе коллектора и на заднем обмоткодержателе предусмотрены специальные канавки. Щеткодержатель имеет литой латунный корпус, который укреплен в кронштейне, вваренном в торцовую стенку станины. В корпус запрессованы два стальных пальца, служащих для крепления щеткодержателей в кронштейне. Пальцы изолированы от корпуса прессматериалом АГ-4С или твердым изоляционным слоем из эпоксидного компаунда, на который надеты изоляторы из прессматериала К-78-51. В щеткодержателе расположены три пары разрезных щеток марки ЭГ-61 (12,5×40×60 мм). Разрезные щетки полезны в случае неровности коллектора или выпучивания одной из коллекторных пластин: сначала на неровности подскакивает одна, а затем вторая половинка щетки, благодаря чему контакт щетки и коллектора сохраняется постоянно. Кроме того, разрезные щетки создают хорошую политуру коллектора и тем самым улучшают условия коммутации. Резиновые амортизаторы на щетках поглощают небольшие толчки и удары, не допуская отрыва щеток от коллектора. В корпусе щеткодержателя имеются два гнезда для щеток. В одно гнездо вставлена одна пара щеток, в другое – две пары. Щетки прижимаются к коллектору спиральными пружинами. Нажатие (42...48 Н) регулируется поворотом втулки, находящейся в центре пружины. Щетки снабжены гибкими шунтами, прикрепленными болтами к корпусу щеткодержателя. Для удобства осмотра и замены щеток на щеткодержателях установлены стойки с заплечиками, позволяющие фиксировать пружины в приподнятом состоянии. Вентиляция электродвигателей типа ЭД118 параллельная, независимая. Охлаждающий воздух нагнетается двумя вентиляторами – по одному на каждую тележку. Струя воздуха от вентилятора поступает в полость электродвигателя через вентиляционное отверстие, расположенное в верхней части станины над коллектором, и дальше движется двумя параллельными потоками подобно тому, как это описано для тягового генератора. Нагретый воздух выбрасывается через отверстия в станине, защищенные сетками и щитками. Щиток у нижнего отверстия направляет поток нагретого воздуха параллельно рельсовому пути. Тяговый электродвигатель ЭД125Б по конструкции существенно отличается от ЭД118Б. Вместо стяжных болтов коллектор скрепляется пружинным разрезным кольцом. Промежуточная втулка (барабан), соединяющая все механические части якоря, позволяет

легко заменить поврежденный вал. Обмотка якоря имеет изоляцию класса Н (полиимид), что позволяет примерно вдвое увеличить ресурс якоря до замены обмотки. Добавочные полюса крепятся к корпусу сквозными (проходными) болтами с гайками, главные полюса – с помощью выступающего из сердечника стержня и болтов, а щеткодержатели в кронштейнах – с помощью привалочной поверхности в виде «елочки».

Тяговые электродвигатели ЭД126 с опорно-рамным подвешиванием устанавливаются на тепловозы 2ТЭ121 с диаметром колес 1250 мм. Станина электродвигателя круглая, сварная из стального проката, имеет опорные площадки и литые из стали подшипниковые щиты. К щиту и корпусу со стороны коллектора прикреплены поворотная траверса с щеткодержателями и ее ручной шестеренный привод. На щите со стороны привода имеются отверстия для выхода охлаждающего воздуха с направляющими и защитными козырьками.

Магнитная система шестиполюсная, крепления главных и добавочных полюсов такие же, как на электродвигателе ЭД125Б, а поперечные размеры примерно в 1,3 раза больше, чем у ЭД118Б и ЭД125Б.

Смазочное устройство электродвигателей ЭД118Б и ЭД125Б имеет две независимые системы смазки: циркуляционную, как у ЭД108А, и фитильную (польстерную), как у ЭД118А, ТЛ-2К, НБ-412К, НБ-418К6 (рис. 11.10). Циркуляционная система смазки включает в себя шестеренный насос, приводимый во вращение от оси колесной пары, и ванну (камеру) со смазкой. Польстерная система имеет закрепленный в обойме фитиль, пружинное нажимное устройство и ванну со смазкой, закрытую крышкой. Смазку (ЖРО ТУ32 ЦТ 520 – 73) для роликовых подшипников тяговых электродвигателей запрессовывают шприц-прессом через масленку.

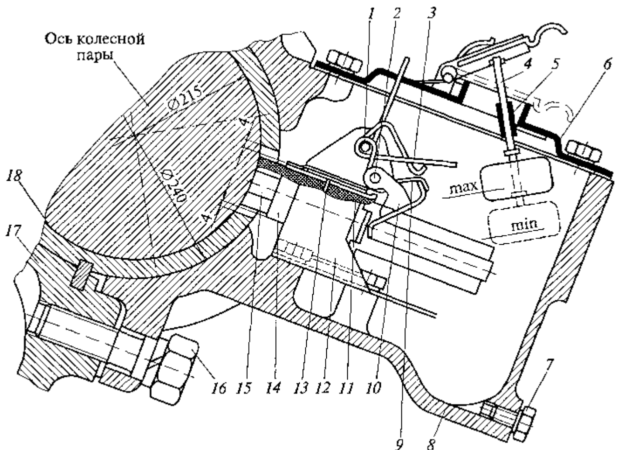



Рис. 11.10. Моторно-осевой подшипник и система смазки электродвигателей ЭД118Б и ЭД125Б.
7, 2 – оси; 3 – фиксатор, 4 – поплавок; 5 – втулка; 6 – крышка; 7 – пробка; 8 – крышка моторно-осевого подшипника; 9 – пружина; 10 – рычаг; 11 ~ пластинчатая пружина; 12 – корпус; 13 – скоба; 14 – коробка; 15 – польстер; 16 – болт; 17 – постель; 18 – вкладыш; mm и max – минимальный и максимальный уровни смазки.

## 11.4. Тяговые электродвигатели электровозов.

Тяговые электродвигатели электровозов (табл. 11.4) имеют конструкцию, во многом схожую с конструкцией тяговых двигателей тепловозов. Особенности их конструкции рассмотрим на примере двигателя НБ-418К6 мощностью 790 кВт (рис. 11.11). Станина двигателей с односторонней зубчатой передачей выполнена аналогично станине тепловозных двигателей. При двухсторонней передаче крутящего момента с обеих сторон вала 5 якоря устанавливаются одинаковые опорные подшипники 4 и 17 и косозубые шестерни.

*Таблица 11.4. Технические характеристики тяговых электродвигателей электровозов.*

| Характеристики | Тип тягового электродвигателя | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | НБ-412М | НБ-412К | НБ-413 | НБ-414В | НБ-418К | НБ-420А | ТЛ-2 | AL4846eT | AL444nP |
| Серия электровоза | ВЛ60 | ВЛ60К | ВЛ80В | ВЛ80 | ВЛ80К | ВЛ82 | ВЛ10 | ЧС2 | ЧС4 |
| Мощность, кВт часовая<br>длительного режима | 690<br>550 | 775<br>675 | 775<br>690 | 810<br>740 | 790<br>740 | 700<br>640 | 650<br>- | 700<br>618 | 900<br>860 |
| Напряжение длительного режима, В | 1450 | 1600 | 900 | 950 | 950 | 1500 | 1500 | 1500 | 800 |
| Ток, А<br>часового режима<br>длительного режима | <br>515<br>410 | <br>515<br>410 | <br>925<br>820 | <br>900<br>830 | <br>880<br>820 | <br>495<br>450 | <br>466<br>- | <br>495<br>435 | <br>1210<br>1150 |
| Частота вращения, об/мин<br>длительного режима<br>максимальная | <br>755<br>1680 | <br>880<br>1680 | <br>935<br>2050 | <br>1030<br>2 250 | <br>890<br>1990 | <br>900<br>2000 | <br>770<br>1625 | <br>630<br>1150 | <br>1150<br>1860 |
| Диаметр якоря, мм | 740 | 740 | 740 | 740 | 590 | 660 | 740 | 900 | 710 |
| Длина якоря, мм | 440 | 440 | 385 | 385 | 420 | 480 | 440 | 360 | 280 |
| Число пазов | 75 | 75 | 111 | 87 | 87 | 58 | 75 | 87 | 87 |
| Число коллекторных пластин | 525 | 525 | 333 | 348 | 348 | 348 | 525 | 609 | 261 |
| Масса, кг | 4220 | 4850 | 4300 | 4000 | 4300 | 4500 | 4700 | 5250 | 2950 |

Моторно-осевые подшипники (см. рис. 11.10) состоят из приливов к остову с цилиндрическими расточками, вкладышей и шапок, которые крепят к остову четырьмя болтами. Они имеют камеры, где размещается смазка и устройство для ее подачи. Для лучшей фиксации шапок в приливах остова вдоль цилиндрической расточки для вкладыша имеются пазы, а на посадочной стороне шапок – соответствующие продольные выступы, входящие в эти пазы. Вкладыши моторно-осевых подшипников выполнены разъемными (из двух половин) и отлиты из латуни марки ЛКС80-3-3 с заливкой баббитом толщиной 3...4 мм. Наконечники главных полюсов имеют очертание, обеспечивающее неравномерный воздушный зазор: минимальный под серединой полюса и увеличивающийся к его краям для улучшения распределения индукции в воздушном зазоре машины, а в конечном счете – для улучшения распределения напряжения между коллекторными пластинами, величины и места его максимального значения. В компенсированных машинах устанавливается специальная компенсационная обмотка, которая снижает возможность возникновения кругового огня на коллекторе (рис. 11.12). Компенсационная обмотка 3 в виде отдельных катушек укладывается в пазы башмаков главных полюсов и закрепляется в них текстолитовыми клиньями. В этом случае дуги полюсных наконечников выполняются концентричными с поверхностью якоря и образуют равномерный воздушный зазор. В настоящее время в двигателях с круглым остовом катушки обмотки возбуждения главных полюсов наматывают обычно на узкое ребро. Это позволяет формовать катушки по радиусу, сопрягая с расточкой в станине. В результате обеспечивается лучшее охлаждение катушек, большая их компактность и прочность и, кроме того, уменьшается высота сердечника главных полюсов, а следовательно, и диаметр станины.

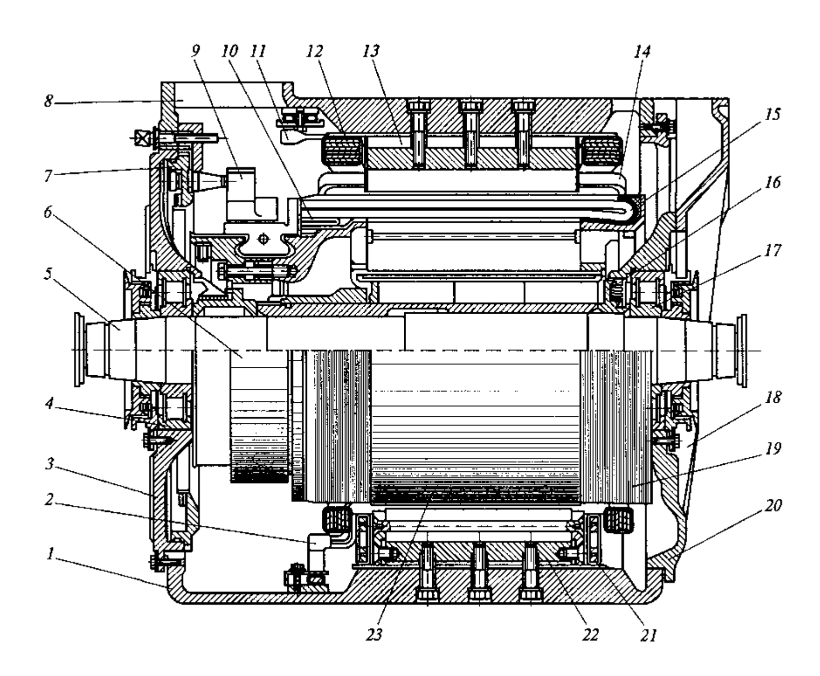



Рис. 11.11. Разрез тягового электродвигателя НБ-418Б.
1 – станина; 2 – шина; 5, 20 – подшипниковые щиты; 4, 17 – подшипники; 5 – вал; 6 – коллектор; 7 – траверса; 8 – воздуховод; 9 – щеткодержатель; 10 – уравнительные соединения; 11 – выводы обмотки возбуждения, 12– обмотка возбуждения, 13 – сердечник главного полюса; 14 – компенсационная обмотка; 15 – обмотка якоря; 16 – лабиринтное уплотнение; 18– кожух; 19– бандаж; 21 – обмотка добавочного полюса; 22 – сердечник добавочного полюса; 23 – якорь.

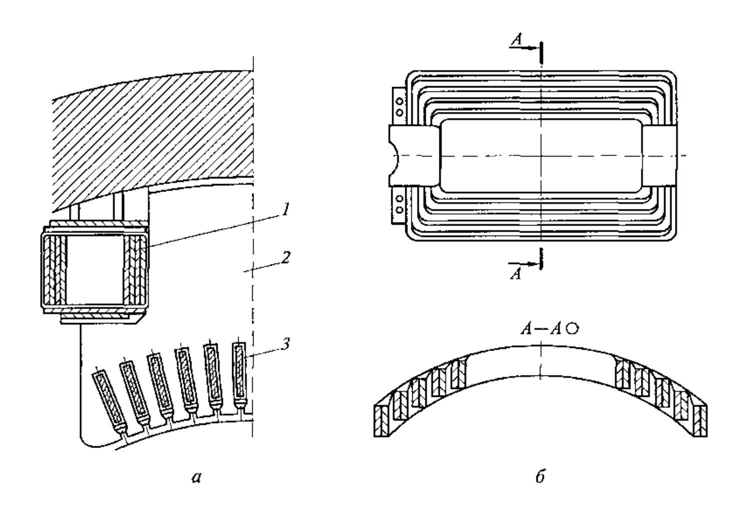



Рис. 11.12. Главный полюс тягового электродвигателя НБ-418Б с компенсационной обмоткой.
*а* – главный полюс, *б* – катушка компенсационной обмотки, 1 – обмотка возбуждения, 2 – сердечник полюса, 3 – компенсационная обмотка.

К концам обмотки приклепывают и припаивают припоем ПМФ выводные скобы с патронами или выводные провода с наконечниками. В качестве межвитковой изоляции используют асбестовую бумагу или электронит толщиной 0,3...0,5 мм, выступающие за ленту меди на 1... 2 мм на каждую сторону. Крепление сердечников и катушек главных полюсов аналогично креплению в тяговых электродвигателях тепловозов. Вал 8 якоря тяговых двигателей изготовляют из хромоникелевой стали 20ХН3А с термической обработкой (рис. 11.13).

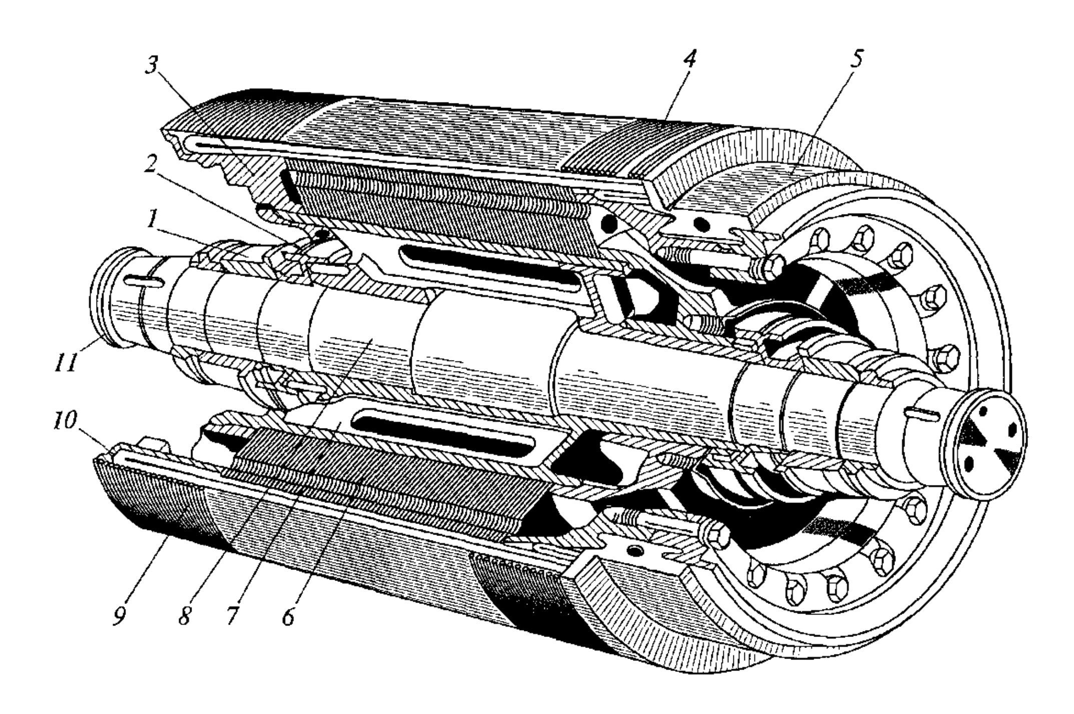



Рис. 11.13. Якорь тягового электродвигателя.
1 – кольцо подшипника, 2, 3 – шайбы якоря, 4, 9 – бандажи обмотки якоря, 5 – коллектор, 6 – сердечник якоря, 7 – втулка, 8 – вал, 10 – обмотка якоря, 11 – упорная шайба.

Вал имеет минимально возможное число переходов по диаметру, причем выполняются они в виде галтелей определенного радиуса для предупреждения концентрации напряжений. Конусность концов вала 1:10. Втулка якоря имеет цилиндрическую форму и отливается из стали 25Л1. Сердечник 6 якоря собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм марок 1212, 1213, 1322, 3411 или 3412. В листах выштамповывают пазы для размещения обмотки, отверстия аксиальных вентиляционных каналов, место для посадочной шпонки.

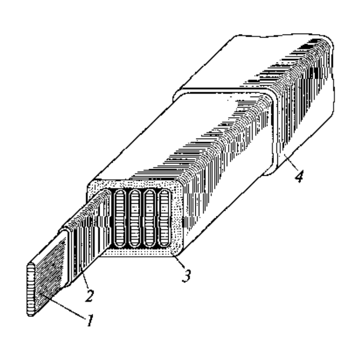



Рис. 11.14. Изоляция катушки якоря.
1 – проводник; 2 – изоляция проводника; 3 – корпусная изоляция; 4 – защитная изоляция.

Обмотка якоря 10 у всех современных тяговых двигателей электровозов петлевая с уравнительными соединениями первого рода, у тяговых двигателей электропоездов – волновая с числом параллельных ветвей 2а = 2. Секции современных тяговых двигателей выполняют с цельными головками, чаще всего закрываемыми бортом обмоткодержателя (двигатели НБ-406, -412М, -412К, -414, -418К; ДК-103, -106Б; РТ-51Д, -113; 1.ДТ.003). У двигателей последних выпусков (НБ-418Кб, -514, -520; AL4846eT, -4846T, -4442nP; TAO-649B1, -649A1; GB317/23a) головки секций – открытые. Это снижает нагрев обмоток, но увеличивает вероятность их повреждения. Материал проводников – прямоугольная голая мягкая обмоточная медь МГМ или обмоточный провод. Изоляция 2 отдельных проводников (шинок) 1 обмотки якоря обычно соответствует классу В и выполняется микалентой ЛФЧ

толщиной 0,1 мм одним слоем вполнахлеста (рис. 11.14). Корпусная изоляция 3 секции делается также микалентой ЛФЧ толщиной 0,1 или 0,13 мм вполнахлеста. Число слоев зависит от напряжения машины по отношению к земле. Поверх корпусной накладывают защитную изоляцию 4 из стеклоленты толщиной 0,15 мм, один слой встык. В последнее время для изоляции якорных катушек применяют липкий эскапон, создающий монолитную изоляцию. Во всех тяговых двигателях обмотка якоря крепится в пазовой части клиньями из текстолита марки Б, стеклотекстолита марки СТ или прессовочной массы АГ-4, под которые уложены прокладки. Отдельные катушки изолированы друг от друга прокладками. В электровозных двигателях пульсирующего тока (НБ-412М, -412К, -418К6, -514, -520) шинки секций укладывают в пазах вертикально. При этом уменьшаются добавочные потери в меди якоря, и улучшается отвод теплоты от меди обмоток. Некоторая технологическая сложность такой укладки заключается в выкручивании концов секций на 90°, их развальцовке для введения в шлицы пластин коллектора и последующем отжиге для снятия внутренних напряжений. Концы секций перед впаиванием лудят припоем ПОС-40 в паяльной ванне. При укладке и креплении обмотки якоря для усиления изоляции катушек в местах выхода из пазов сердечника якоря устанавливают U-образные скобочки из гибкого миканита. Изоляцию нажимных шайб в местах расположения лобовых соединений катушек якоря выравнивают так, чтобы уровень ее после опрессовки был выше дна шлица коллекторных пластин на 1 мм и находился на уровне дна пазов якоря. Иногда эта изоляция выполняется в виде заранее отформованных жестких миканитовых полуколец (например, у двигателя ДК-103).

Бандажи тяговых двигателей ДК-103, -106, НБ-406, ТЛ-2К, AL646eT, -4846zT, ТАО-649В1, -649А1 и GB317/23a выполнены из луженой магнитной или немагнитной проволоки, скреплены скобочками из белой луженой жести и пропаяны припоем ПОС-40. У всех двигателей, кроме ТАО-649А1 и -649В1, бандажная проволока – круглая (диаметром 2 мм), а у названных двигателей – прямоугольная (1,5×3 мм). В случае необходимости бандажи накладывают в два слоя. Двигатели НБ414, -418К6, -420Б, -514, -520 выпускают со стеклобандажами из непрерывных параллельно ориентированных стеклонитей, пропитываемых полиэфирной смолой. Общая толщина бандажа 4 мм. Двигатели НБ-412М, -412К и РТ-51Д выполнены с металлическими бандажами или стеклобандажами.

Коллекторы тяговых двигателей выполняют арочного типа со стальными нажимными конусами. Материал коллекторных пластин – твердая медь холодной протяжки трапецеидального сечения марки Ml с пределом прочности 300 МПа (30 кгс/мм$^2$) и кадмиевая с пределом прочности 350 МПа (35 кгс/мм$^2$). Петушки чаще всего составляют единое целое с пластиной, но иногда (двигатели НБ-418К и -420Б) их приваривают. Шлицы пластин лудят припоем ПОС-40. Изоляцию между коллекторными пластинами изготовляют из твердого коллекторного миканита марки КФШ или КФА, содержащего не более 3% склеивающих веществ. Изоляционные цилиндры, помещаемые между кольцом коллекторных пластин и коробкой коллектора, имеют толщину 1,25...2,0 мм. Коллекторная коробка в современных двигателях отечественного производства объединяется с передним обмоткодержателем якоря и напрессовывается на втулку якоря. Часть миканитовой манжеты, выступающую за торец коллекторных пластин, бандажируют стеклянной электроизоляционной лентой и покрывают термостойкой эмалью ГФ-92-ХК. Щеточный аппарат у тяговых двигателей электровозов и электропоездов постоянного тока состоит из кронштейнов щеткодержателей, укрепляемых на станине двигателя, и установленных на них корпусов щеткодержателей со щетками. У электровозных двигателей пульсирующего тока шестиполюсного исполнения кронштейны щеткодержателей устанавливают на поворотной траверсе для подведения к смотровым люкам любого из шести щеткодержателей. Корпуса щеткодержателей изготовляют из латуни ЛС-59-1 и ЛК-80-3. Щетки устанавливают марок ЭГ-2А и -74. Для двигателей постоянного тока – цельные щетки, а для двигателей пульсирующего тока с более трудными условиями коммутации – составные из двух частей. Чтобы разгрузить нажимные пружины от токов, щетки обычно соединяют с корпусом

щеткодержателя токоведущим проводом. В современных тяговых двигателях усилие нажимного устройства передается на щетку через резиновую накладку, демпфирующую колебания щетки. Нажимные устройства в щеткодержателях выполняют или со спиральными пружинами из плоской ленты, или с цилиндрическими винтовыми пружинами из круглой проволоки. В тяговых двигателях последних выпусков (НБ-418К6, -514, -520) щеткодержатели имеют винтовые цилиндрические пружины из пружинной стали 60С2.

Контрольные вопросы:

1. Какие изоляционные материалы используются при изготовлении тяговых электрических машин?
2. Какие особенности имеет конструкция тяговых генераторов постоянного тока?
3. Где располагаются уравнительные соединения?
4. В чем особенность работы реактивных щеток?
5. Каковы условия работы тяговых электродвигателей?
6. Каково назначение траверсы?
7. С какой целью в коллекторных пластинах делают круглые отверстия?

# Глава 12. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

## 12.1. Назначение и условия работы вспомогательных машин.

По назначению вспомогательные машины локомотивов можно разделить на несколько групп.

1. Машины – регуляторы, выполняющие основные функции по регулированию энергетической цепи тепловоза. К этой группе относятся многообмоточные возбудители постоянного тока специального исполнения. Они принимают сигналы по различным параметрам энергетической цепи (напряжение и ток тягового генератора, скорость дизеля и т.п.) и, управляя возбуждением главного генератора в соответствии с этими сигналами, обеспечивают нужную характеристику передачи. На отечественных и некоторых зарубежных тепловозах для этой цели используются возбудители с расщепленными полюсами.
2. Машины, передающие сигналы от тиристорных и магнитных усилителей к системе возбуждения генератора. Для этой цели используются возбудители постоянного или переменного тока.
3. Машины переменного тока, питающие силовые обмотки магнитных усилителей (подвозбудители). Эти машины обычно имеют повышенную частоту (400 Гц) с целью уменьшения размеров магнитных усилителей и самой машины.
4. Машины, осуществляющие обратную связь по частоте вращения дизеля (тахогенераторы), соединенные с валом.
5. Машины – источники питания цепей управления и вспомогательных цепей. Вспомогательные генераторы работают параллельно с аккумуляторной батареей и питают цепи управления аппаратов, задающие обмотки возбудителей и магнитных усилителей, а также вспомогательные двигатели, цепи освещения и сигнализации. На некоторых локомотивах устанавливают генераторы для питания электрического отопления пассажирских поездов. Генераторы управления ЭПС (электроподвижного состава) служат для питания низковольтных цепей управления, освещения и подзарядки аккумуляторной батареи. Мотор-генераторы необходимы для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей при электрическом торможении; их устанавливают только на электровозах с рекуперативным торможением.
6. Электродвигатели вспомогательных агрегатов (мотор-вентиляторы и мотор-компрессоры). Мотор-вентиляторы предназначены для подачи охлаждающего воздуха в тяговые двигатели, а на некоторых электровозах и тепловозах также в пусковые и тормозные сопротивления.

Мотор-компрессоры обеспечивают питание сжатым воздухом пневматических тормозов, работу электрических аппаратов с пневматическим приводом.

7. Пусковые электродвигатели (стартер-генераторы). На тепловозах с гидравлической и механической передачами, а также с тяговыми генераторами переменного тока для пуска дизеля применяют двигатели постоянного тока, питающиеся от аккумуляторной батареи. На электровозах постоянного тока обычно все электродвигатели вспомогательных машин питаются постоянным током. К контактной сети может быть непосредственно подключен каждый двигатель или два последовательно включенных двигателя, например двигатели вентиляторов. Двигатели также могут питаться от специального преобразователя (делителя напряжения), дающего напряжение, величина которого отличается от напряжения контактной сети. При питании электродвигателей непосредственно от контактной сети возникают трудности с обеспечением надежной коммутации, так как повышается среднее напряжение между смежными коллекторными пластинами. Наибольшие трудности возникают при переходных режимах, во время пуска электродвигателей или при резких колебаниях напряжения на токоприемнике. Эти процессы обычно сопровождаются значительными бросками тока, которые могут вызывать сильное искрение под щетками или даже круговой огонь по коллектору. При последовательном включении двух двигателей обеспечить их устойчивую коммутацию несколько легче, поскольку напряжение на зажимах каждого двигателя понижается вдвое. Недостаток этой системы заключается в том, что при выходе из строя одного из последовательно соединенных двигателей необходимо отключить всю группу двигателей. При питании электродвигателей через специальный преобразователь обеспечивается более легкая коммутация всех двигателей, но увеличивается общее количество оборудования и снижается надежность всей системы, повышаются вес машин и их стоимость. В связи с этим система вспомогательных машин, питающихся непосредственно от контактного провода, получила распространение на всех отечественных электровозах постоянного тока, а также на электровозах ЧС1, ЧС2 и ЧС3. Номинальным напряжением для двигателей вспомогательных машин в зависимости от характера их включения является номинальное напряжение на токоприемнике или номинальное напряжение, разделенное на число машин, которые включены последовательно постоянно. Как и все электрооборудование электровозов, двигатели вспомогательных машин подвержены воздействию чрезмерных перенапряжений, возникающих в контактной сети. Их величина может достигать 10...15кВ, а в отдельных случаях даже 30кВ при продолжительности воздействия 1000...5000 мкс. Вспомогательные генераторы тепловозов приводятся во вращение непосредственно от коленчатого вала дизеля через специальные редукторы, а электродвигатели запитываются от вспомогательных генераторов, тяговых генераторов или генераторов собственных нужд. При расположении вспомогательных машин в кузове улучшается защита от пыли, влаги и других внешних воздействий. Однако при этом повышается температура окружающего воздуха за счет теплоты, выделяемой работающим в кузове оборудованием. При работе электровоза превышение температуры воздуха в кузове над температурой наружного воздуха может составлять 30°С и более. Электродвигатели компрессоров работают в режиме повторно-кратковременных включений, частота и длительность цикла которых зависят от расхода сжатого воздуха и режима тяги поезда электровозом. При поездной работе электровоза в среднем бывает 5 – 10 пусков в час. Это предъявляет жесткие требования к коммутационной устойчивости и перегрузочной способности электродвигателей компрессоров. По опыту эксплуатации рабочий режим электродвигателя компрессора соответствует ПВ = 30%, но при определении его мощности за расчетный принимают режим при ПВ = 50% с циклами включения и отключения по 5 мин. Электродвигатели вентиляторов и генераторы управления обычно работают в длительном режиме. Пуск электродвигателей вентиляторов также сопровождается резкими бросками тока, достигающими семикратного номинального значения. Поэтому двигатели вентиляторов часто остаются включенными не только при движении электровоза, но и на остановках. Режим работы мотор-генератора является кратковременным и определяется длительностью рекуперативного торможения. В зависимости от условий эксплуатации продолжительность рекуперативного торможения может составлять 5...25% общего времени

движения по перегону. При этом максимальная длительность работы в режиме рекуперации не должна превышать 30...40 мин. Пуск мотор – генератора также очень затруднен, так как величина броска тока при пуске иногда в 5 – 7 раз превышает ток установившегося режима.

## 12.2. Конструкция вспомогательных электрических машин электровозов.

Несмотря на существенные различия вспомогательных машин по назначению, мощности, характеристикам и другим показателям, они имеют общие элементы конструкции. Все двигатели вентиляторов и компрессоров являются одно-коллекторными, четырехполюсными последовательного возбуждения, а двигатели преобразователей – четырехполюсными смешанного возбуждения. Применение последовательного возбуждения в двигателях вентиляторов и компрессоров обусловлено тем, что такие двигатели имеют наиболее простую схему включения, характеризуются большим пусковым моментом и высокой перегрузочной способностью. Двигатели последовательного возбуждения также обладают лучшими эксплуатационными характеристиками при неустановившихся процессах работы оборудования. Все это повышает их надежность по сравнению с другими типами двигателей. Однако двигатели последовательного возбуждения из-за нестабильности частоты вращения при изменениях нагрузки не пригодны для привода таких машин как возбудители рекуперации. Для автоматической стабилизации режима применяют двигатели смешанного возбуждения. Величину среднего межламельного (между коллекторными пластинами) напряжения у вспомогательных машин допускают большей, чем в тяговых двигателях; нередко она достигает 40...42 В. Для повышения стабильности работы при значительных колебаниях напряжения и улучшения пусковых характеристик магнитные системы вспомогательных машин выполняют обычно слабо насыщенными. Выполнение генераторов со слабо насыщенной магнитной системой облегчает регулирование напряжения и поддержание его в заданных пределах при значительных колебаниях частоты вращения двигателя привода, которые вызваны колебаниями напряжения на токоприемнике. Обмотки полюсов и якорей вспомогательных машин изготовляют из медного провода с изоляцией классов А или В. В основном эти машины выполняют с самовентиляцией, однако известны случаи выполнения вспомогательных машин и с независимой вентиляцией (НБ-431А).

### 12.2.1. Мотор-генераторы (преобразователи)

Мотор-генераторы состоят из высоковольтного двигателя, включенного на напряжение контактной сети, и низковольтного генератора, подающего напряжение на обмотки возбуждения тяговых двигателей при рекуперативном торможении. Обе эти машины, как правило, выполняют в общем остове, а якоря собирают на одном валу. Мотор-генератор НБ-430В (рис. 12.1) – самовентилируемый агрегат. Вентилятор 11 расположен на конце общего вала со стороны коллектора генератора 9. Двигатель преобразователя – четырехполюсный, смешанного возбуждения; генератор – шестиполюсный, также смешанного возбуждения. Остов двигателя 4 неразъемный, цилиндрической формы, отлит из стали 25Л-1. Обмотки последовательного и независимого возбуждения намотаны из прямоугольного медного провода ПБД. Изоляция катушек выполнена из лакоткани толщиной 0,2 мм тремя слоями вполнахлеста и одним слоем киперной ленты толщиной 0,45 мм вполнахлеста. Катушки независимого возбуждения генератора выполнены из круглого медного провода ПБД. Они изолированы одним слоем тафтяной ленты толщиной 0,25 мм, по одному слою ленты из лакоткани толщиной 0,2 мм вразбежку и киперной ленты толщиной 0,45 мм вполнахлеста.
Катушки независимого возбуждения из медного прямоугольного провода намотаны двумя витками на каждый полюс. Их изоляция состоит из одного слоя асбестовой ленты, положенной вразбежку, шести слоев вполнахлеста микаленты толщиной 0,13 мм и одного слоя вполнахлеста киперной ленты толщиной 0,45 мм.

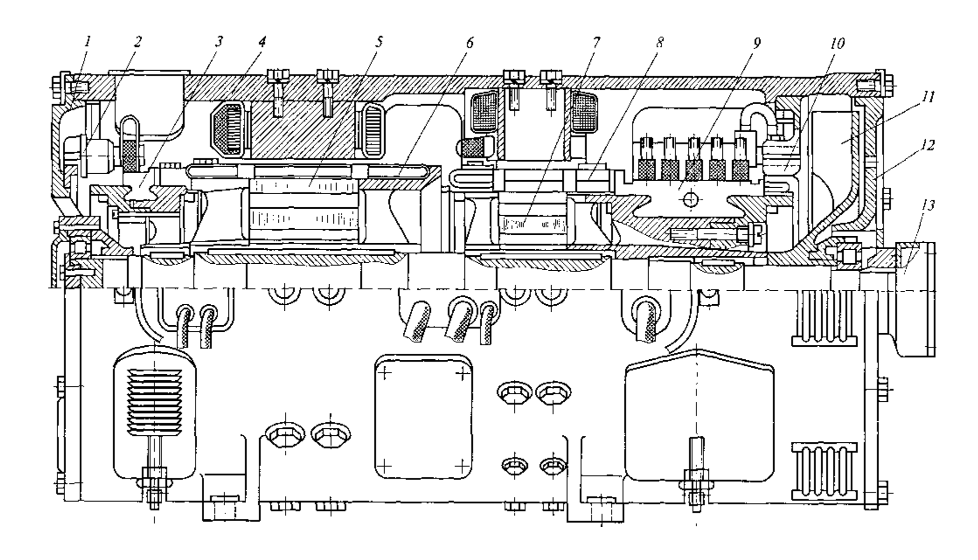



Рис. 12.1. Мотор-генератор НБ-430В.
1, 12 – подшипниковые щиты, 2, 10 – щеточные устройства двигателя и генератора,
3 – коллектор двигателя, 4 – остов, 5 – сердечник якоря двигателя,
6, 8 – обмотки якорей, 7– сердечник якоря генератора, 9 – коллектор генератора,
11 – вентилятор, 13 – реле оборотов.

Сердечники добавочных полюсов преобразователя выполнены из стальных поковок. Корпусная изоляция катушек полюсов двигателя состоит из одного слоя вполнахлеста тафтяной ленты толщиной 0,25 мм, трех слоев вполнахлеста лакоткани толщиной 0,2 мм и одного слоя вполнахлеста киперной ленты толщиной 0,45 мм. Корпусная изоляция катушек добавочных полюсов генератора состоит из двух слоев вполнахлеста микаленты толщиной 0,13 мм и киперной ленты толщиной 0,45 мм, наложенной одним слоем вполнахлеста и одним – вразбежку. Сердечники якорей 5 и 7 насажены на вал без якорной втулки. Коллектор двигателя 3 имеет 343 пластины, а коллектор генератора 9 – 228. Толщина межламельной изоляции соответственно равна 1 и 0,8 мм. Диаметр и длина рабочей поверхности коллектора двигателя равны 390 и 32 мм, а коллектора генератора – 380 и 200 мм. Волновая обмотка 6 якоря двигателя состоит из 343 четырехвитковых секций, выполненных из медного провода ПЭЛШД, по семь секций в каждой катушке. Каждая катушка якорной обмотки изолирована лентой из лакоткани толщиной 0,1 мм (семь оборотов), лентой из лакоткани толщиной 0,2 мм и тафтяной лентой толщиной 0,25 мм, наложенных по одному слою вполнахлеста. В пазу расположено 14 сторон секций, которые имеют 56 эффективных проводников. Обмотка якоря укреплена на сердечнике бандажом из стальной проволоки диаметром 1,5 мм, 30 витков которого приходятся на пазовую часть и 86 витков – на лобовые части. Петлевая обмотка 8 якоря генератора состоит из 228 одновитковых секций, выполненных из медного провода, изолированного одним слоем микаленты толщиной 0,075 мм вполнахлеста. Катушка имеет четыре секции. Катушки якоря генератора изолированы микалентой толщиной 0,1 мм по три слоя вполнахлеста и стеклолентой толщиной 0,1 мм, наложенной одним слоем встык. Обмотка закреплена бандажом из стальной проволоки диаметром 1,5 мм (30 витков на сердечнике и 75 на лобовых частях). На мотор-генераторе НБ-436В установлены две поворотные траверсы щеткодержателей, укрепленные на подшипниковых щитах. На траверсе двигателя смонтированы четыре однощеточных щеткодержателя. Траверса генератора имеет шесть пальцев, каждый из которых несет пять щеткодержателей. Сила нажатия на щетку равна 12...15 Н (1,2...1,5 кгс) для двигателя и 10...12 Н (1,0...1,2 кгс) для генератора и обеспечивается регулированием нажимного устройства щеткодержателей. Щетки ЭГ-2А двигателя имеют размеры 10×25 мм, генератора – 16×32 мм. Якорь преобразователя опирается на роликовые подшипники. Со стороны двигателя установлен фиксирующий подшипник 80-92317Л1, со стороны генератора – плавающий 80-32317Л1 Наружные кольца

запрессованы в подшипниковые щиты 1 и 12, изготовленные из стального литья, а внутренние на вал якоря. Подшипниковые щиты запрессованы в остове и закреплены шестью болтами с пружинными шайбами. Конструкции преобразователей НБ-429А и НБ-436В не имеют принципиальных отличий.

### 12.2.2. Электродвигатели привода вспомогательных агрегатов.

Электродвигатели типа НБ-430А, ТЛ-110М и -101. Эти электродвигатели служат для привода ротора вентилятора и якоря генератора управления. Ротор вентилятора насажен на вал электродвигателя со стороны, противоположной коллектору. Якорь генератора управления смонтирован на консольной части вала электродвигателя со стороны коллектора, а остов генератора укреплен торцовой частью на подшипниковом щите двигателя. Остов 4 двигателя ТЛ-110М (рис. 12.2) отлит из стали 25Л-1, имеет цилиндрическую форму, четыре лапы для крепления в кузове электровоза и две горловины по торцам, закрытые подшипниковыми щитами 7 и Р. Остов двигателя ТЛ-101 – сварной из листовой стали толщиной 30 мм. В подшипниковых щитах установлены роликовые подшипники якоря. У двигателей ТЛ-110М и -101 со стороны коллектора смонтирован упорный подшипник 2H92317KI, а с противоположной стороны – радиальный роликоподшипник 2H32417KI. Главные полюса двигателей расположены по вертикальной и горизонтальной осям. Основные листы сердечников главных полюсов набраны из листовой стали Ст2кп толщиной 1,5 мм и сжаты заклепками между крайними листами толщиной 5 мм. Главный полюс прикреплен к остову тремя шпильками. Сердечники добавочных полюсов массивные литые или из толстолистового проката. На нижней части сердечника установлены латунные наконечники для закрепления катушки. Для обеспечения надежной коммутации при переходных режимах между остовом и сердечником добавочного полюса предусмотрены немагнитные прокладки толщиной 3 мм. Катушки главных полюсов двигателей ТЛ-110М и НБ-430А намотаны прямоугольным проводом соответственно марки ПБД и ПСД.

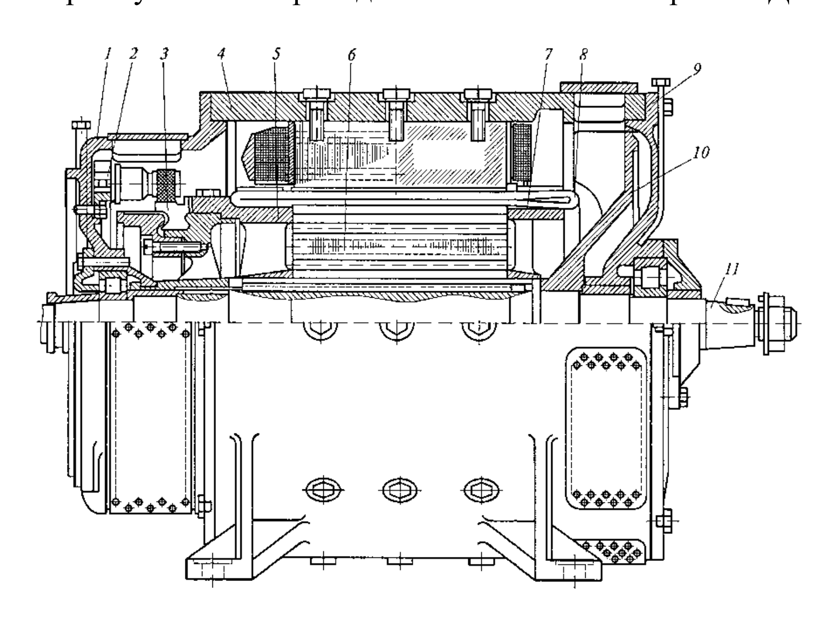



Рис. 12.2. Электродвигатель ТЛ110М:
1, 9 – подшипниковые щиты; 2 – щеткодержатель, 3 – коллектор, 4 – остов,
5, 7 – нажимные шайбы; 6 – сердечник якоря,
8 – обмотка якоря; 10 – вентилятор, 11 – вал.

Корпусная изоляция катушек главных полюсов двигателя НБ-430А состоит из шести слоев лакоткани толщиной 0,2 мм и одного слоя тафтяной или киперной ленты толщиной 0,4... 0,45 мм, намотанных вполнахлеста, а двигателя ТЛ101 – из шести слоев микаленты ЛФЧ1

толщиной 0,13 мм вполнахлеста. Необходимая форма катушки достигается применением картонных прокладок и деревянных клиньев. Катушки добавочных полюсов двигателей ТЛ110М и НБ430А намотаны медным проводом ПБА прямоугольного сечения, а двигателя ТЛ101 – проводом ПСД. Корпусная изоляция их выполнена так же, как корпусная изоляция катушек главных полюсов. Выводные концы катушек полюсов изготовлены из провода ПС-3000 или ПС-4000 сечением 1,45×4,4 мм. Сердечник якоря 6 двигателей набран из листов электротехнической стали 1212 и 1213 толщиной 0,5 мм, изолированных с обеих сторон лаковой пленкой. Двигатели ТЛ110М, -101 и НБ430А имеют коллектор 3 с 343 пластинами. Диаметр его равен 390 мм, а длина рабочей части – 32 мм. Обмотка якоря 8 волновая, с неразрезными катушками (у двигателя НБ-430А катушки трехвитковые из круглого медного провода ПЭЛШД). Корпусная изоляция якорных катушек в пазовой части состоит из 7,5 слоев лакоткани толщиной 0,1 мм и одного слоя полотняной ленты, наложенных вполнахлеста. Слои проводников в секции по высоте отделены один от другого прокладками из электрокартона толщиной 0,1 мм. Корпусная изоляция катушек якоря двигателя ТЛ-101 выполнена лентой, намотанной в шесть слоев из стеклолакоткани ЛСБ толщиной 0,2 мм и покрытой одним слоем вполнахлеста стеклоленты толщиной 0,1 мм. Охлаждение двигателя осуществляется насаженным на его вал вентилятором 10 с радиальными лопатками. Щеткодержатель 2 состоит из литого латунного корпуса, кронштейна, фарфорового изолятора и механизма нажатия на щетку. На кронштейне корпус щеткодержателя укреплен с помощью гребенки, позволяющей регулировать зазор между корпусом и коллектором. Кронштейны установлены на поворотной траверсе, закрепленной на подшипниковом щите. Пальцы имеют изоляцию из изодина или из прессмассы АГ-4 и фарфоровый изолятор. Нажатие на щетку осуществляется витой плоской пружиной.

**Электродвигатель А2934/4.** Этот электродвигатель рассчитан на номинальное напряжение 1500 В и представляет собой четырехполюсную самовентилируемую машину последовательного возбуждения с добавочными полюсами. Корпусная изоляция двигателя рассчитана на напряжение 3000 В. Конструкция двигателя во многом аналогична конструкции двигателя ТЛ-110М. Коллектор диаметром 385 мм имеет 385 пластин. Алюминиевый ротор вентилятора прикреплен к стальному диску, насаженному на вал двигателя со стороны, противоположной коллектору. Вал двигателя опирается на два роликовых подшипника: упорный со стороны коллектора и радиальный со стороны, противоположной коллектору. На двигателе смонтированы два щеткодержателя, укрепленные изолированными пальцами на поворотной траверсе. Траверса закреплена на подшипниковом щите.

**Электродвигатель НБ404А.** Для привода компрессора Э-500 используется самовентилируемый четырехполюсныи двигатель последовательного возбуждения НБ404А (рис. 12.3). Для упрощения сочленения двигателя с компрессором его вал 12 входит непосредственно в картер компрессора, и на него посажена шестерня 9 компрессора. В связи с этим двигатель не имеет подшипникового щита и якорного подшипника со стороны передачи. Станина и подшипниковый щит со стороны коллектора – стальные, литые. В щите установлен двухрядный сферический роликоподшипник 3612 (11).

Сердечники главных полюсов набраны из стальных (Ст2) листов толщиной 1,5 мм; сердечники добавочных полюсов – литые. Сердечники главных полюсов укреплены в остове шпильками М20, а добавочных полюсов – болтами М20. Под добавочными полюсами предусмотрен второй зазор, равный 2 мм. Катушки главных полюсов имеют по 749 витков, а добавочных – по 400 витков. Для навивки катушек использован провод ПБД диаметром 1,62 мм. Корпусная изоляция катушек состоит из шести слоев вполнахлеста лакоткани толщиной 0,2 мм и одного слоя вполнахлеста хлопчатобумажной ленты толщиной 0,4 мм.

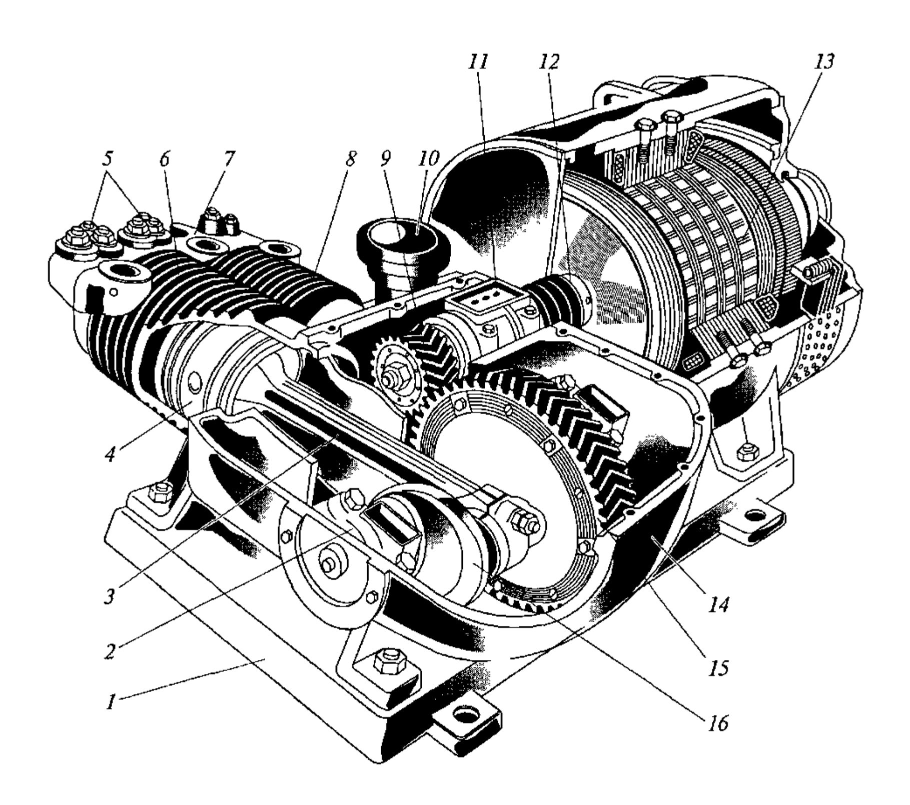



Рис. 12.3. Компрессор Э-500 с электродвигателем НБ404А.
1 – плита; 2 – подшипник коленчатого вала; 3 – шатун; 4 – поршень; 5 – заглушки; 6– цилиндр низкого давления; 7– клапанная коробка; 8 – цилиндр высокого давления; 9 – шестерня компрессора; 10 – сапун; 11 – подшипник вала якоря; 12 – вал; 13 – якорь электродвигателя; 14 – корпус компрессора; 15 – большое зубчатое колесо; 16 – коленчатый вал компрессора.

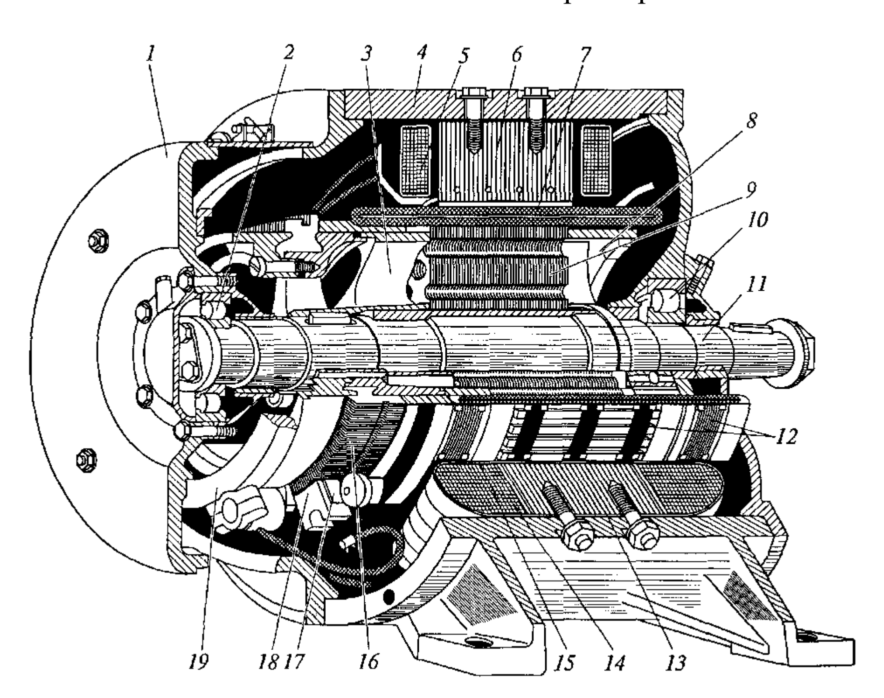



Рис. 12.4. Электродвигатель НБ431А.
1 – подшипниковый щит; 2, 10 – подшипники; 3 – передняя нажимная шайба; 4 – остов; 5 – катушка добавочного полюса; 6 – сердечник добавочного полюса; 7 – обмотка якоря; 8 – задняя нажимная шайба; 9 – сердечник якоря; 11 – вал; 12 – бандажи; 13 – сердечник главного полюса; 14 – катушка главного полюса; 15 – пружинный фланец; 16 – коллектор; 17– щеткодержатель; 18 – щетка; 19 – траверса.

Сердечник якоря 13 изготовлен из электротехнической стали 1212 или 1213 толщиной 0,5 мм. Волновая обмотка якоря навита из провода ПЭЛШД. Корпусная изоляция катушек якорной обмотки состоит из 7,5 слоев лакоткани толщиной 0,1 мм вполнахлеста и одного слоя полотняной ленты вполнахлеста.

**Электродвигатель НБ431А**. Для привода компрессора КТ-6 предназначен четырехполюсный двигатель НБ-431А последовательного возбуждения, низкооборотный (рис. 12.4). Частота вращения двигателя в номинальном режиме равна 440 об/мин. Двигатель имеет независимую систему вентиляции. При номинальной мощности 21 кВт и ПВ = 50% расход охлаждающего воздуха составляет 14 $м^3$/мин яри статическом напоре в коллекторной камере 9 мм вод. ст. Работа двигателя без принудительной вентиляции возможна при номинальной мощности и ПВ = 20%.

### 12.2.3. Генераторы управления.

Генераторы цепей управления – низковольтные машины, рассчитанные на работу при номинальном напряжении 50 В. Они работают при больших колебаниях потребляемой мощности и в сравнительно широком диапазоне частоты вращения. Частота вращения изменяется в зависимости от напряжения на токоприемнике, так как генераторы управления приводятся во вращение двигателями последовательного возбуждения. При этом напряжение на зажимах генератора должно составлять 50 В, а при усиленном подзаряде батареи – 65...70 В. Генераторы управления имеют параллельное возбуждение, поэтому они менее чувствительны к колебаниям нагрузки и напряжения по сравнению с генераторами последовательного возбуждения.

**Генератор управления ТЛ-110В**. Это четырехполюсная машина без добавочных полюсов и собственных подшипниковых щитов (рис. 12.5). Станина 6 генератора с торцовой стороны закреплена на подшипниковом щите 8 электродвигателя ТЛ110М, установленном со стороны коллектора. Станина двигателя либо отлита из стали 25Л-1, либо сварена из стального проката марки Ст3 и имеет цилиндрическую форму. Сердечник главного полюса 5 набран из листов стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплен стальными заклепками. Каждый полюс прикреплен к остову двумя стальными шпильками М16. Катушка Главного полюса 7 намотана из обмоточного провода ПСД диаметром 2,12 мм и имеет 510 витков. Корпусная изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛСЭП-934-ТПл сечением 0,13×20 мм в три слоя с перекрытием вполнахлеста. Воздушный зазор между якорем и полюсами составляет 2,2 мм. Якорь генератора насажен консольно на цилиндрическую часть вала электродвигателя ТЛ-1 ЮМ. Сердечник якоря 4 набран из листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. Обмотка якоря 9 волновая и состоит из 27 катушек, уложенных в пазы якоря. Выводы обмоток припаяны к петушкам коллектора оловом 02 (ГОСТ 860-75) с флюсом КСп (ОСТ 160.614.011-71). Обмотка якоря в пазах и ее лобовые части закреплены стеклобандажной лентой ЛСБ-F 0,2×20 мм. Катушки 7 якорной обмотки изготовлены из провода ПЭТВСД сечением 1,25×6,0 мм, имеющего восемь элементарных проводников, расположенных по высоте паза в два ряда по четыре проводника. Корпусная изоляция состоит из двух слоев стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5СПл толщиной 0,11 мм и одного слоя фторопласта толщиной 0,03 мм, уложенных вполнахлеста, а также одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенной встык. Коллектор 2, состоящий из 107 пластин, насажен на стальную втулку. Щеточный аппарат 1 имеет траверсу поворотного типа, на которой укреплены четыре изоляционных пальца со щеткодержателями. В щеткодержателях установлены щетки ЭГ-2А. Генератор имеет независимую вентиляцию.

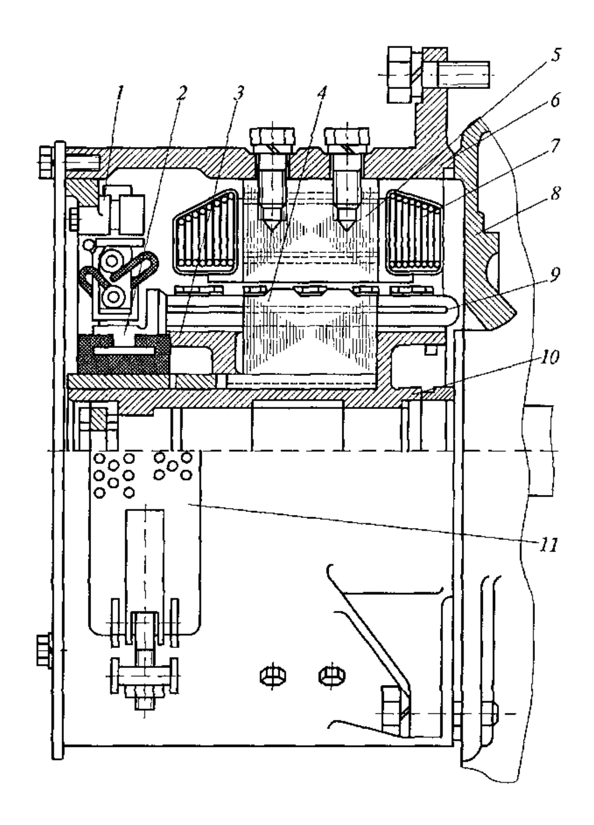



Рис. 12.5. Генератор управления ТЛ110В.
1 – щеточный аппарат, 2 – коллектор; 3 – нажимная шайба; 4 – сердечник якоря;
5– сердечник главного полюса; б– станина; 7– катушка главного полюса;
8 – подшипниковый щит; 9 – обмотка якоря; 10 – втулка; 11 – крышка.

**Генераторы управления ДК405А и -405К**. Это четырехполюсные генераторы без добавочных полюсов, не имеющие вала якоря и подшипниковых щитов. Детали якоря собраны на втулке, которая насажена на конец вала двигателя, а остов генератора торцовой частью закреплен на подшипниковом щите двигателя. Сердечники главных полюсов шихтованы из листовой стали толщиной 1,5 мм, а катушки намотаны из круглого медного провода ПБД. Корпусной изоляцией служат: один слой вполнахлеста ленты из лакоткани толщиной 0,2 мм, один слой тафтяной ленты толщиной 0,25 мм и один слой вполнахлеста киперной ленты толщиной 0,45 мм. Втулка якоря отлита из стали вместе с задней нажимной шайбой. Сердечник якоря фиксирован на втулке шпонкой и нажимной шайбой. Листы сердечника штампованы из электротехнической стали 1211 толщиной 0,5 мм. Для предотвращения распушения крайние листы сердечника изготовлены из стали Ст2 толщиной 1 мм. Обмотка якоря волновая, имеет 27 катушек, выполненных из медного проводника прямоугольного сечения. Корпусной изоляцией катушек служит лента из лакоткани ЛИП толщиной 0,1 мм ($^2/_4$ оборота) и один слой вполнахлеста киперной ленты толщиной 0,45 мм. Обмотка якоря закреплена бандажами из проволоки диаметром 1,5 мм. Коллектор обычной конструкции собран на литом корпусе и скреплен нажимным конусом и специальной кольцевой гайкой, навернутой на корпус коллектора и застопоренной двумя болтами. Щеткодержатели установлены на поворотной траверсе. Вентиляция генератора независимая, осуществляется вентилятором двигателя.

Генераторы управления 3А-1731/4 и ПАЛ. В отличие от генераторов ДК405 эти генераторы изготовляют как самостоятельные электрические машины. Их устанавливают на остове двигателя вентилятора, а вращающий момент передается клиновой ременной передачей. Конструкция этих генераторов аналогична конструкции генераторов ДК-405А и -405К. Катушки главных полюсов генератора 3А-1731/4 намотаны из изолированного круглого провода, а добавочных — из голого медного провода прямоугольного сечения. Якорь имеет обычную конструкцию. Обмотка якоря волновая, закреплена на сердечнике клиньями.

## 12.3. Конструкция вспомогательных электрических машин тепловозов.
### 12.3.1. Возбудители и вспомогательные генераторы.

Возбудители предназначены для питания постоянным током обмотки независимого возбуждения тягового генератора непосредственно или через выпрямитель (синхронные), а вспомогательные генераторы – для питания различных нагрузок собственных нужд тепловоза. Возбудители и вспомогательные генераторы постоянного тока имеют унифицированную конструкцию и выполняются в виде двухмашинных агрегатов с общим валом. Благодаря этому уменьшаются габаритные размеры и масса, а также упрощается монтаж и привод их на тепловозе. Наиболее распространенными и характерными по устройству и эксплуатации их возбудителей и вспомогательных генераторов являются агрегаты А-706Б и МВТ-25/9 + МВГ-25/11. Характеристики возбудителей и вспомогательных генераторов приведены в табл. 12.1. и 12.2.

**Двухмашинный агрегат А-706Б.** Этот агрегат установлен на тепловозах 2ТЭ10М, 2ТЭ10В, 2М62, ТЭП60 и состоит из вспомогательного генератора ВГТ-275/120 и возбудителя В-600 защищенного исполнения с самовентиляцией (рис. 12.6).

*Таблица 12.1. Характеристики возбудителей тепловозов.*

| Тип возбудителя | Серия тепловоза | Мощность, кВт | Напряжение, В | Ток, А | Частота вращения, об/мин |
|---|---|---|---|---|---|
| МВТ-25/9 | ТЭМ2, ТЭМ2М | 5,6 | 75 | 75 | 2000 |
| В-600 | 2ТЭ10М, ТЭП60, 2ТЭП60, М62, 2М62, 2ТЭ10В | 20,6 | 165 | 125 | 1800 |

*Таблица 12.2. Характеристики вспомогательных генераторов тепловозов.*

| Тип вспомогательного генератора | Серия тепловоза | Мощность, кВт | Напряжение, В | Ток, А | Частота вращения, об/мин |
|---|---|---|---|---|---|
| МВГ-25/11 | ТЭМ2, ТЭМ2М | 5,75 | 75 | 77 | 2000 |
| ВГТ-275/120 | 2ТЭ10М, ТЭП60, 2ТЭП60, М62, 2М62, 2ТЭ10В | 12 | 75 | 160 | 1800 |

Сердечники главных полюсов 13 и 19 набраны из листов стали и стянуты заклепками. На сердечнике 13 главного полюса возбудителя расположены обмотка независимого возбуждения возбудителя 11, получающая питание от амплистата (*амплистат* – магнитный усилитель с внутренней обратной связью), и размагничивающая обмотка 10, получающая питание от вспомогательного генератора (ВГ). На сердечнике 19 главного полюса ВГ намотана катушка параллельного возбуждения. Катушки имеют открытые и перекрещенные выводы, от корпуса они изолированы микалентой и тафтяной лентой. Для предотвращения продольного сдвига катушек между ними и башмаком сердечника устанавливают пружинные рамки. В станинах 12 и 17 укреплено по пять добавочных полюсов (место шестого полюса занято выводами обмотки). Сердечники добавочных полюсов ВГ 18 и возбудителя 14 стальные литые, катушки одинаковы и изолированы микалентой и тафтяной лентой. К подшипниковым щитам 2 крепятся изоляционные траверсы 5, имеющие по шесть щеткодержателей 6. Корпуса щеткодержателей отлиты из латуни. В каждый корпус устанавливается по одной щетке марки ЭГ-4. Спиральные пружины обеспечивают усилие нажатия на щетку 11...20 Н. Траверса допускает сдвиг щеток при их установке на нейтрали.
Якоря ВГ и возбудителя смонтированы на общем валу 22. Сердечники якорей 9 набраны из листов стали толщиной 0,5 мм, насажены на вал и зажаты между корпусами коллекторов и обмоткодержателями. Число и размеры пазов, длина сердечника, размеры обмотки якоря и число коллекторных пластин и обеих машин одинаковы. Волновая двухслойная обмотка

укладывается в 44 открытых пазах с шагом по пазам 1 – 8 и с шагом по коллектору 1 – 44. Коллекторы барочного типа спрессованы пластмассой. Втулка коллектора ВГ удлинена, и на нее насажены два кольца (для вспомогательных генераторов ВГТ-300/120), предназначенные для съема переменного напряжения для питания радиостанции тепловоза. Двухмашинный агрегат охлаждается вентилятором центробежного типа, закрепленным на валу якоря в средней части между якорями возбудителя и ВГ.

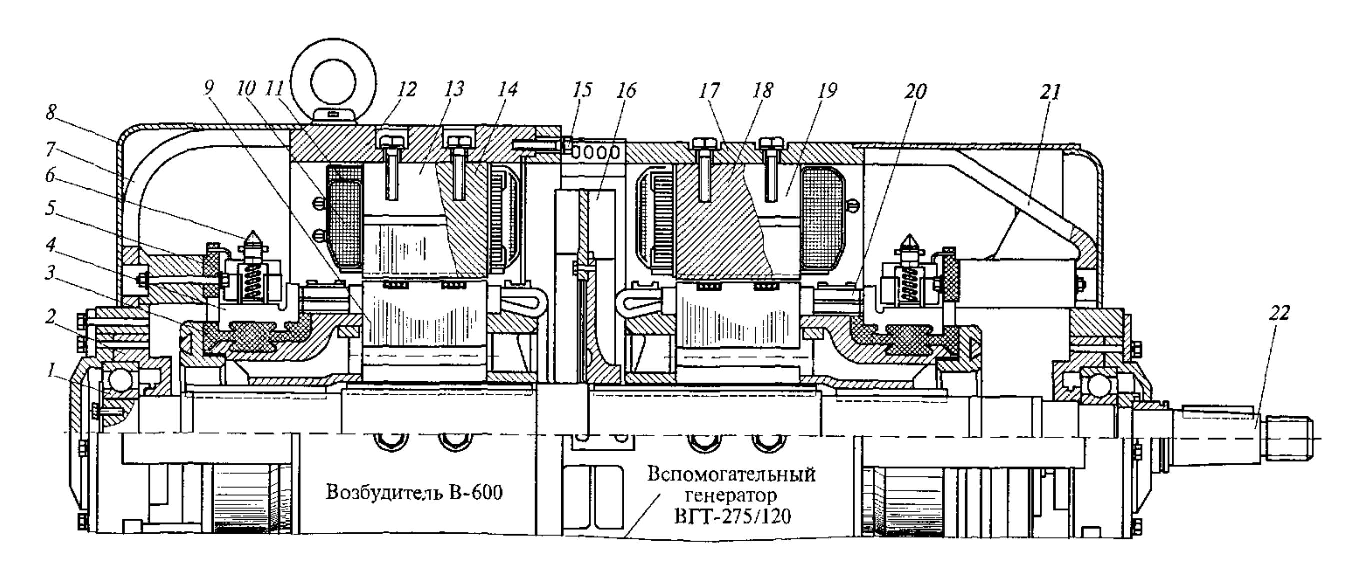



Рис. 12.6. Двухмашинный агрегат А-706Б.
1 – подшипник; 2, 21 – подшипниковые щиты; 3 – основание коллектора; 4 – коллектор; 5 – траверса; 6 – щеткодержатель; 7– корзина; 8 – кожух;
9 – сердечник якоря возбудителя; 10 – размагничивающая обмотка возбудителя;
11 – обмотка независимого возбуждения возбудителя; 12, 17 – станины;
13 – сердечник главного полюса возбудителя;
14 – сердечник добавочного полюса возбудителя; 15 – болт; 16 – вентилятор;
18 – сердечник добавочного полюса ВГ; 19 – сердечник главного полюса ВГ;
20 – обмотка якоря ВГ; 22 – вал.

**Двухмашинный агрегат тепловозов ТЭМ2, ТЭМ2М, ТЭМ1**. Агрегат состоит из вспомогательного генератора МВГ-25/11 и возбудителя МВТ-25/9. Станины возбудителя и вспомогательного генератора составляют общий разъемный корпус. К станине возбудителя МВТ-25/9 крепятся четыре главных полюса, каждый из которых состоит из сердечника и обмотки. Сердечники набраны из стальных листов толщиной 2 мм и разделены латунной прокладкой на две части неравного сечения – насыщенную и ненасыщенную. Часть сердечника меньшего сечения (насыщенная) охватывается дифференциальной обмоткой, имеющей семь витков медной полосы сечением 2,63×1,47 мм. Параллельная обмотка возбуждения охватывает обе части сердечника и имеет 242 витка из изолированного медного провода марки ПВД диаметром 1,95 мм. В собранном виде катушки обмоток пропитываются компаундом и покрываются эмалью. Катушки обмоток возбудителя выполняются с открытыми и перекрещивающимися выводами. Магнитные потоки параллельной и дифференциальной обмоток направлены встречно, поэтому поток под общей частью полюса определяется разностью этих потоков. Электродвижущая сила, индуцируемая результирующим потоком, суммируется с ЭДС, индуцируемой магнитным потоком параллельной обмотки другой части полюса, и с увеличением тока генератора уменьшается, поэтому внешняя характеристика тягового генератора имеет вид гиперболы. Траверса допускает сдвиг щеткодержателей при их установке в нейтральное положение. Каждый щеткодержатель несет по одной щетке марки ЭГ-4. Усилие нажатия на щетку – 10...11Н. Сердечник якоря набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Сердечник

возбудителя от сердечника вспомогательного генератора отделен магнитным экраном, состоящим из латунных листов. На валу сердечник удерживается шпонкой. Шаг обмотки по пазам 1 – 11, по коллектору 1 – 68. Коллектор возбудителя содержит 135 пластин. Вспомогательный генератор МВГ-25/11 постоянного тока выполнен по схеме параллельного возбуждения. Сердечники главных полюсов набраны из стальных листов толщиной 2 мм, которые скреплены стальными заклепками. Катушка главного полюса имеет 394 витка провода марки ПБД диаметром 1,56 мм, уложенных в 14 слоев. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 15°С равно 9 Ом. Сердечники добавочных полюсов литые стальные, катушки намотаны из меди МГМ сечением 0,8×3,0 мм. Сердечник якоря набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы имеют вентиляционные отверстия, паз для шпонки и 46 пазов, в которые укладывается волновая обмотка с двумя параллельными ветвями. Секция обмотки состоит из двух витков из прямоугольной меди (1,56×5,1 мм) с изоляцией ПБД. Коллектор вспомогательного генератора собран из 92 пластин.

### 12.3.2. Стартер-генераторы.

Стартер-генератор применяется на тепловозах с электропередачей переменно-постоянного тока, используется кратковременно в качестве электродвигателя для пуска дизеля (с питанием от аккумуляторной батареи) и постоянно – в качестве вспомогательного генератора, осуществляющего питание цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батарей. Стартер-генератор – это четырехполюсная электрическая машина постоянного тока с независимым возбуждением и самовентиляцией. Особенностями конструкции стартер-генератора являются наличие пусковой обмотки на главных полюсах магнитной системы (для работы в режиме электродвигателя при пуске дизеля), закрепление пластин на втулке коллектора с помощью общей гайки (вместо болтов) и выполнение подшипниковых щитов в виде плоских дисков с окнами, закрытыми щитками. Стартер-генератор (рис. 12.7) состоит из станины, подшипниковых щитов, главных и добавочных полюсов, якоря и подшипников. В гнездо переднего подшипникового щита устанавливается подшипник 76313, заднего – 7032315. К станине крепятся четыре главных и четыре добавочных полюса. Сердечник добавочного полюса цельный, обмотка последовательно соединена с обмоткой якоря. К переднему подшипниковому щиту 5 крепится траверса, а к ней щеткодержатели с разрезными щетками типа ЭГ4. Коллектор 7 – арочного типа. Охлаждение стартер-генератора – самовентиляция вытяжного типа, класс изоляции – не ниже F. Режим работы в качестве генератора – длительный. Стартер – генератор питает электродвигатели привода компрессоров, обеспечивает зарядку аккумуляторной батареи и другие вспомогательные нагрузки. Стартер-генератор выдерживает в течение 2 мин. аварийное повышение частоты вращения на 20% сверх номинальной без повреждений и остаточных деформаций.

### 12.3.3. Электродвигатели привода вспомогательных агрегатов.

**Электродвигатели 2П2К и 2П2**. Данные электродвигатели имеют мощность 37 кВт и 25 кВт соответственно и частоту вращения 1450 об/мин. Они предназначены для привода компрессора тепловозов 2ТЭ116, ТЭП70 и ТЭМ7 и питаются от стартер-генератора номинальным напряжением постоянного тока 110 В. Электродвигатель 2П2К (рис. 12.8) представляет собой четырехполюсную электрическую машину постоянного тока со смешанным возбуждением и конструктивно выполнен аналогично стартер-генератору ПСГ. Якорь 8 электродвигателя установлен на двух шариковых подшипниках 76-31 высокого класса точности. Электродвигатель допускает перегрузку по току не более 40% в течение 15 с при номинальном напряжении 110 В. Для облегчения пуска электродвигателя используется резистор, который на период разгона включается последовательно в цепь якоря. Для привода компрессора ВУ-3,5/9-1450 используется электрический двигатель 2П2КУХЛ2. При

установке на тепловозе компрессора ПК-5,25 для его привода используется двигатель 2П2КУХЛ2. Конструкция двигателей аналогична.

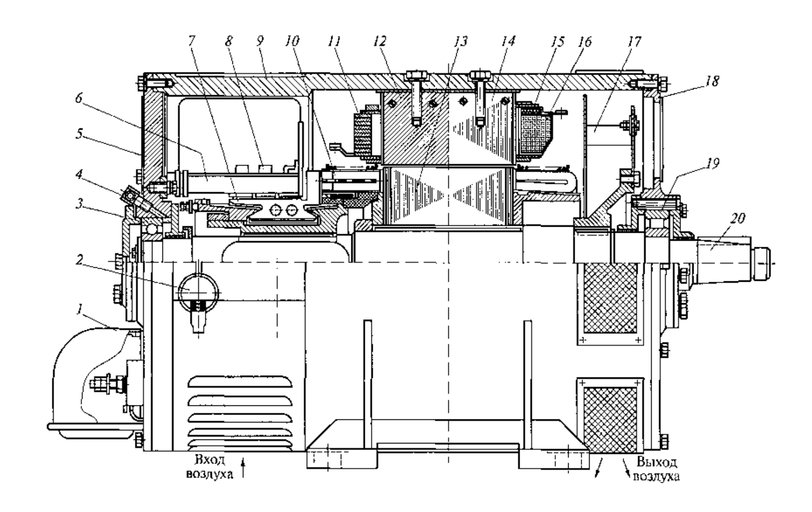



Рис. 12.7. Стартер-генератор ПСГ.
1 – коробка выводов обмоток, 2 – кольцевой замок; 3, 19 – подшипники; 4 – масленка, 5, 18 – подшипниковые щиты; 6 кронштейн, 7– коллектор, 8 – щеткодержатель; 9 – станина; 10 – обмотка якоря; 11 – катушка добавочного полюса, 12 – сердечник добавочного полюса, 13 – сердечник якоря, 14 – сердечник главного полюса, 15 – пусковая обмотка, 16 – обмотка независимого возбуждения; 17 – вентилятор; 20 – вал.

**Электродвигатели серии П**. Это электродвигатели постоянного тока морского исполнения. На отечественных тепловозах и электровозах они применяются для привода масло- и топливопрокачивающих насосов, вентиляторов кабины машиниста и кузова, а также калорифера. Они получают питание от аккумуляторной батареи или вспомогательного генератора при работе дизеля. Технические данные двигателей серии П приведены в табл. 12.3. Электродвигатель П-21 (рис. 12.9) состоит из станины, двух главных и одного добавочного полюсов, двух подшипниковых щитов, якоря и двух шариковых подшипников.

Станина имеет цилиндрическую форму. Главные полюса установлены по вертикали и крепятся к станине двумя болтами каждый. Обмотка в зависимости от типа двигателя может быть смешанного возбуждения или параллельного, т. е. содержать две или одну катушку. Сравнительно легкие условия коммутации позволяют применить только один добавочный полюс, а на месте второго находится коробка выводов 18. На переднем подшипниковом щите 5 крепится изоляционная траверса, а к ней – щеткодержатели 6. Передний подшипниковый щит 5 имеет крышки люка 7 для осмотра щеток, щеткодержателей, соединительных проводов и коллектора. Обмотка якоря 7 петлевая всыпная, имеет две параллельные ветви. Коллектор 2 набирается из медных пластин, корпус коллектора изготовляется из асборезольной массы.

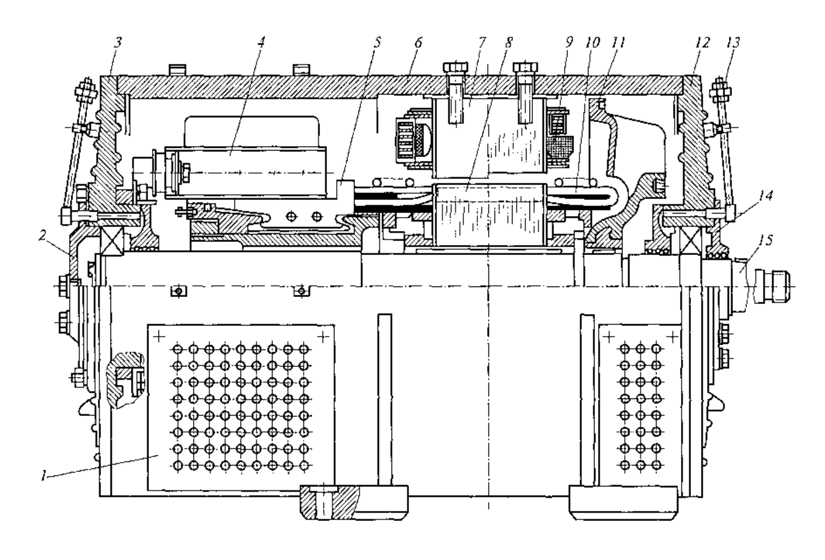



Рис. 12.8. Электродвигатель 2ГТ2К.
1 – вентиляционная решетка; 2, 14 – крышки подшипников;
3, 12 – подшипниковые щиты; 4 – щеткодержатель; 5 – коллектор; 6 – станина;
7– сердечник главного полюса; 8 – якорь; 9 – обмотка возбуждения; 10 – обмотка якоря; 11 – вентилятор; 13 – трубка для смазки; 15 – вал.

*Таблица 12.3. Технические данные электродвигателей серии П.*

| Параметр | Тип электродвигателя | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | П-11 | | П-12 | | П-21 | | П-22 | | | П-31 | П-41 |
| Мощность, кВт | 0,5 | 0,2 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 1,4 | 2,2 | 1,22 | 0,9 | 2,2 | 4,2 |
| Напряжение, В | 75 | 75 | 110 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 64 |
| Ток, А | 9,9 | 4,2 | 11,8 | 9,4 | 9,3 | 23,8 | 36,7 | 21,8 | 16,1 | 36,7 | 84 |
| Частота вращения якоря, об/мин | 2800 | 1740 | 3000 | 1450 | 1350 | 3100 | 3000 | 3300 | 1450 | 3000 | 2200 |
| Число главных полюсов | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| Число добавочных полюсов | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| Число щеток | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 8 |
| Число витков обмотки:<br>параллельного возбуждения<br>последовательного<br>возбуждения добавочного<br>полюса | 1750<br>12<br>116 | 1150<br>-<br>175 | 1850<br>11<br>126 | 1800<br>18<br>142 | 1800<br>18<br>142 | 1800<br>10<br>78 | 1400<br>16<br>78 | 1200<br>14<br>88 | 1100<br>12<br>103 | 2200<br>5<br>50 | 600<br>2<br>17 |
| Число пазов | 14 | 14 | 14 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 27 |
| Число пластин коллектора | 56 | 56 | 56 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 | 81 |

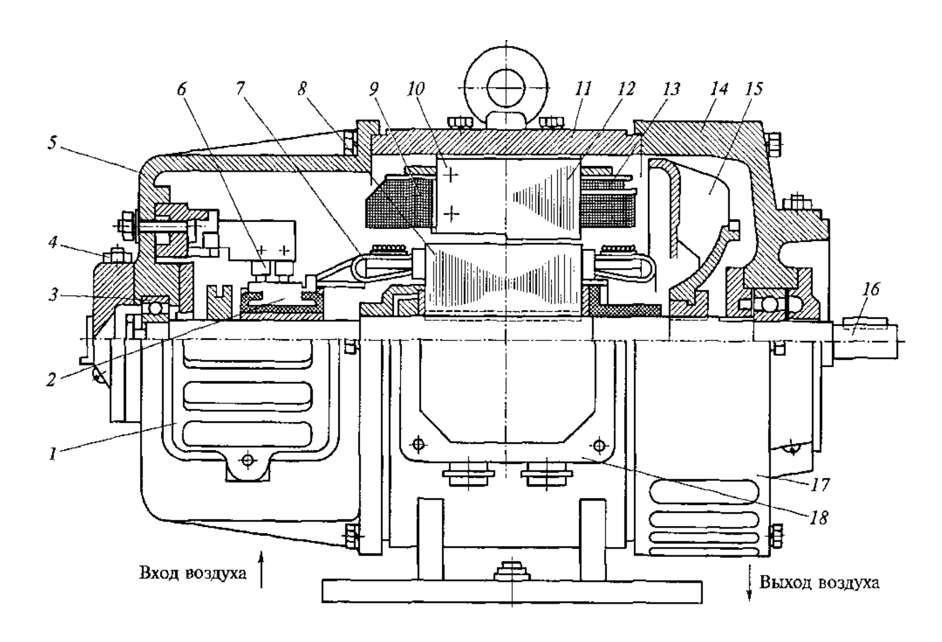



Рис. 12.9. Электродвигатель серии П.
1, 17 – крышки люков; 2 – коллектор; 3 – подшипник; 4 – пресс-масленка;
5, 14 – подшипниковые щиты; 6 – щеткодержатель; 7– обмотка якоря;
8 – сердечник якоря; 9– обмотка добавочного полюса;
10– сердечник добавочного полюса; 11 – станина; 12 – сердечник главного полюса;
13 – обмотка главного полюса; 15 – вентилятор; 16 – вал; 18 – коробка выводов.

Контрольные вопросы:
1. Для чего предназначены вспомогательные электрические машины на тяговом подвижном составе?
2. Объясните назначение вспомогательного генератора.
3. Каково назначение генератора управления?
4. Каковы особенности работы электродвигателей привода компрессора?
5. Какие электрические машины общепромышленного исполнения применяются на подвижном составе?
6. Укажите особенности работы электродвигателей топливоподкачивающего и маслопрокачиваюшего насосов.
7. Объясните особенности работы вспомогательных агрегатов на электровозах.
8. Каково назначение возбудителя на тепловозе?
9. Укажите способ получения переменного напряжения во вспомогательных генераторах типа ВГТ-300/120.

## Глава 13.
## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ.
### 13.1. Тяговые генераторы тепловозов.

Тяговые генераторы (ТГ) переменного тока предназначены для эксплуатации на тепловозах с электрической передачей переменно-постоянного тока и служат для преобразования механической энергии дизеля в электрическую. На тепловозах 2ТЭ116, ТЭП70 и ТЭМ7 установлены синхронные генераторы типа ГС, технические данные которых представлены в табл. 13.1. Вырабатываемый генератором трехфазный переменный ток частотой до 100 Гц подается в выпрямительную установку для выпрямления, а затем к тяговым двигателям постоянного тока. Все типы синхронных тяговых генераторов отечественных тепловозов состоят из одних и тех же узлов, поэтому конструкцию ТГ рассмотрим на примере ТГ типа ГС-501А. Генератор ГС-501А (рис. 13.1) представляет собой синхронную машину

защищенного исполнения с независимым возбуждением и принудительной вентиляцией. Охлаждающий воздух подается осевым вентилятором через сборный стальной патрубок со стороны, противоположной контактным кольцам (со стороны дизеля). В нижней части подшипникового щита под контактными кольцами укреплен стальной патрубок для выброса в атмосферу нагретого воздуха. При необходимости воздух может частично выбрасываться в кузов тепловоза. Охлаждающий воздух поступает снаружи тепловоза через воздушные фильтры, установленные с боков кузова. Генератор вращается по часовой стрелке, если смотреть со стороны контактных колец.

*Таблица 13.1. Технические характеристики тяговых генераторов тепловозов.*

| Тип генератора | Серия тепловоза | Мощность, кВт | Линейное/фазное напряжение, В | Ток при линейном/фазном напряжении, А | Частота вращения, об/мин | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ГС-501А | ТЭП70 | 2 800 | 580/360 | 2×1540/2×2400 | 1000 | 6000 |
| ГС-501А | 2ТЭ116 | 2 190 | 535/290 | 2×1330/2×2350 | 1000 | 6000 |
| ГС-515 | ТЭМ7 | 1400 | 280/175 | 2×1540/2×2500 | 1000 | 6000 |
| А-714 | 2ТЭ121, 2ТЭ116А | 2 800 | 580/360 | 2×1 520/2×2400 | 1000 | 8200 |

Генератор ГС-501А состоит из статора, в пазах которого располагаются две трехфазные обмотки, и ротора с двенадцатью явно-выраженными полюсами возбуждения, питаемыми постоянным током через кольца и щетки. Статор 8имеет сварную конструкцию, изготовленную из стальных листов, которым с помощью вальцевания придается цилиндрическая форма. К статору параллельно его оси с двух сторон привариваются опорные лапы для установки генератора на поддизельную раму. В верхней части статора приварены кронштейны 12, служащие опорами для установки на генераторе синхронного возбудителя и стартер-генератора. Сердечник статора 11 выполнен из штампованных листов высоколегированной электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В листах имеются отверстия, образующие вентиляционные каналы. В пазах статора уложена волновая двухслойная обмотка 13, катушки которой изолированы от корпуса полиамидной и активированной фторопластовой пленками с выстилкой паза пленкостеклотканью. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения обмотка статора 13 выполнена по схеме двух независимых звезд (с двумя параллельными ветвями в каждой), сдвинутых одна по отношению к другой на 30 эл. град. Секция обмотки выполнена из девяти уложенных друг на друга широкой стороной медных проводников и имеет прямоугольную форму, соответствующую форме пазов сердечника 11. Лобовые части обмотки крепятся к статору 8 пластмассовыми обмоткодержателями с запрессованными в них шпильками. Система выводов обмотки статора – усиленная, припаяна к шинам серебросодержащим припоем. Всего шесть фазных, два нулевых вывода и два вывода обмотки возбуждения 6 (на роторе). Ротор имеет сварно-литой корпус с барабаном 14, на который нашихтован и спрессован пакет индуктора из стальных листов толщиной 2 мм. В листах выштампованы пазы в форме «ласточкина хвоста», в которых на готовом корпусе ротора клиньями крепят 12 полюсов 10 моноблочной конструкции. Сердечники полюсов ротора набраны из листов стали толщиной 1,4 мм, спрессованы и стянуты четырьмя стальными шпильками. Катушки обмотки возбуждения 6 полюсов ротора выполнены из медной ленты МГМ размером 1,35×25 мм, гнутой «на ребро». Между витками меди проложена изоляция. Катушка пропитывается в сборе с сердечником полюса 10 в эпоксидном компаунде и имеет изоляцию типа «Монолит-2» класса F. Все выводы обмотки возбуждения 6соединены последовательно с помощью контактных сегментов и болтов, катушки с прямой и перекрещенной намоткой витков меди устанавливаются на роторе через одну. В пазы полюсных башмаков встроена компенсационная (успокоительная) обмотка 15, состоящая из медных стержней, спаянных между собой по торцам короткозамыкающими сегментами и пропаянных в них.

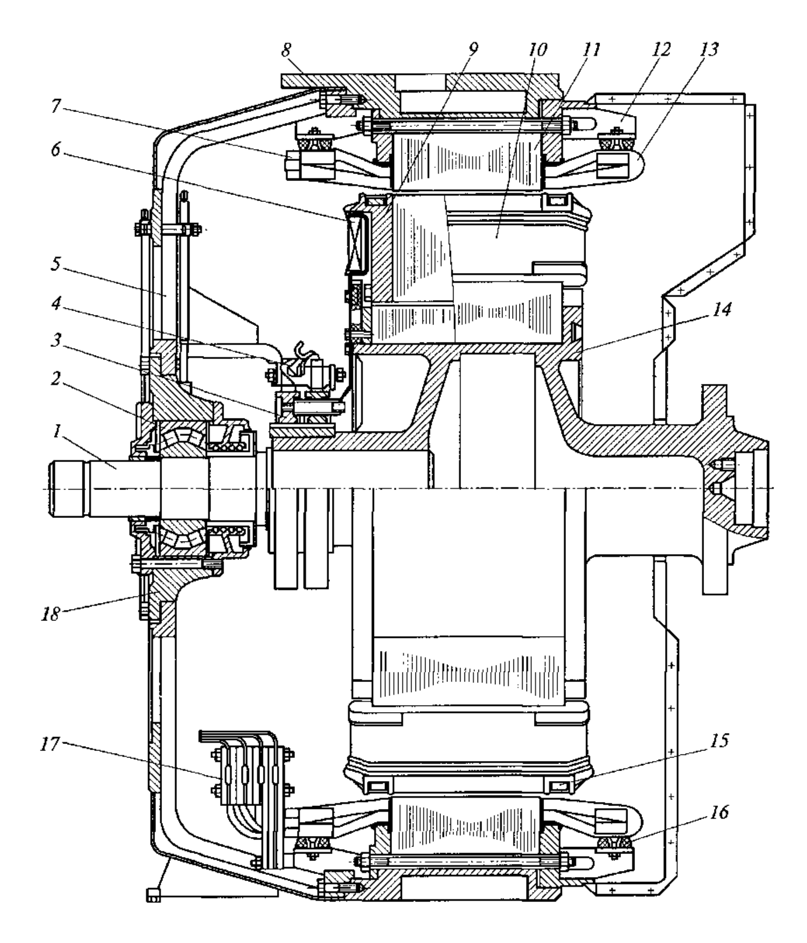



Рис. 13.1. Синхронный генератор ГС-501А.
1 – вал; 2 – подшипник; 3 – контактное кольцо; 4 – щеткодержатель;
5 – подшипниковый щит; 6 – обмотка возбуждения; 7 – выводы статорной обмотки;
8 – статор; 9– нажимная щека; 10– полюс; 11 – сердечник статора; 12– кронштейн;
13 – обмотка статора; 14– барабан ротора; 15 – компенсационная обмотка;
16 – крепление обмотки статора; 17 – выводы; 18– корпус подшипника.

Генератор имеет один подшипниковый щит 5 и свободный конец вала 1 со стороны контактных колец 3, благодаря чему возможен отбор мощности на собственные нужды тепловоза в случае отсутствия специального источника. Подшипниковый щит является несущей частью генератора, имеет сварную конструкцию и укреплен болтами на статоре. В щите имеется разъемный корпус подшипника 18, обеспечивающий возможность замены роликового подшипника 2 без снятия щита 5 с генератора и без отъема генератора от дизеля. Подшипник 2 самоустанавливающийся, двухрядный, со сферическими роликами.

Внутри полости подшипникового щита 5 на изогнутых ребрах с помощью четырех изоляторов закреплены две подвески, на каждой из которых установлены три радиальных латунных щеткодержателя 4. Конструкция щеткодержателя обеспечивает постоянное усилие нажатия пружины на щетку независимо от величины износа последней. Щетка вставляется в щеткодержатель и прижимается пружиной через рычаг к контактному кольцу 3 ротора. Всего установлено шесть щеток марки ЭГ-4. Щетки снабжены резиновыми амортизаторами, через которые на щетку передается постоянное усилие нажатия рычага пружины 16...20 Н (1,74...2 кгс). Ток к щеткам подводится по плетеным медным проводникам, наконечники которых через подвески соединены с выводами обмотки возбуждения. Контактные кольца 3, изготовленные из специальной антикоррозионной стали, напрессовываются на корпус ротора. Камера контактных колец закрыта легкосъемными сегментными сварно-штампованными крышками, установленными по периметру конусной части подшипникового щита. Весь крепеж генератора защищен от самоотвинчивания при повышенной частоте вращения и коррозии.

## 13.2. Тяговые агрегаты тепловозов.

На тепловозах 2ТЭ116УП, -121, ТЭП70БС и -80 установлены тяговые агрегаты типов А714, -713 и -711, в состав которых входят тяговый синхронный генератор (СГ) и генератор собственных нужд (ГСН), или отопительный. На пассажирском тепловозе ТЭП70БС он именуется генератором энергоснабжения. Тяговый агрегат А-714 защищенного исполнения имеет независимую систему охлаждения. Его основным несущим узлом является статор тягового синхронного генератора (рис. 13.2). Статор 75 ГСН, служащий одновременно передней нажимной шайбой для сердечника 14 статора, упирается в торец промежуточного щита, чем обеспечивается необходимая жесткость конструкции. Торцовый подшипниковый щит 8 агрегата по конструкции подобен щиту тягового синхронного генератора ГС-501А. Роторы агрегата имеют общий корпус безвальной конструкции (сварно-литой) в виде барабана 19. На корпусе расположены две самостоятельные системы возбуждения: тягового СГ и ГСН. Со стороны ГСН расположены контактные кольца 6 обеих машин. Конструкция тягового СГ подобна описанной выше. Генератор собственных нужд обеспечивает питание обмотки возбуждения 18 тягового генератора, привода вспомогательных механизмов и машин, устройств автоматики и др. Возбуждение ГСН осуществляется по принципу самовозбуждения. Это явнополюсная машина, имеющая 12 полюсов, расположенных на роторе и получающих питание от собственной статорной обмотки. В пазах сердечника 14 статора располагаются две трехфазные обмотки, сдвинутые на 30 эл. град. Сердечник 14 статора выполнен из листов стали 3313 толщиной 0,5 мм, в которых выштамповано 40 вентиляционных каналов. В пазах статора уложена волновая обмотка, имеющая изоляцию класса Н. Сердечники полюсов 13 ротора набраны из листов стали толщиной 1,4 мм, спрессованы и стянуты шпильками. Обмотка возбуждения 11 и полюсов выполнена из медной ленты ЛММ 1,08×22 мм, намотанной на ребро, и имеет изоляцию класса F типа «Монолит-2». Агрегат имеет 20 выводов. Восемь выводов 22 и 24 статорной обмотки тягового СГ расположены со стороны дизеля, из них шесть принадлежат двум трехфазным обмоткам, соединенным в звезду, и две – нулевым точкам. Двенадцать выводов расположены со стороны контактных колец: шесть – от двух трехфазных обмоток статора ГСН, соединенных в звезду, два – от нулевых точек и четыре – от обмоток возбуждения СГ и ГСН.

## 13.3. Генераторы переменного тока пассажирских вагонов.

В системах электроснабжения пассажирских вагонов широко применяют индукторные генераторы переменного тока, основные технические характеристики которых приведены в табл. 13.2.

**Принцип действия.** В отличие от обычного синхронного генератора индукторный генератор не имеет на роторе обмоток и колец со щетками для подвода напряжения. В зависимости от расположения обмотки возбуждения индукторные генераторы подразделяют на машины с осевым и радиальным возбуждением. Генераторы ГСВ-2, -8А, 2ГВ-003 и 2ПВ-001 – это машины с осевым возбуждением. В этих машинах обмотка статора 4, в которой при вращении ротора индуктируется переменная ЭДС, выполняется неподвижной и закладывается в пазы статора (рис. 13.3). Обмотка возбуждения 5 также неподвижна и выполнена в виде двух кольцевых катушек, расположенных за пределами пакета статора. Ротор имеет чередующиеся зубцы 9 и пазы, образующие как бы полюсы машины. Магнитный поток $Ф_в$, создаваемый каждой обмоткой возбуждения 5, проходит вдоль оси втулки 8 ротора, расходится в зубцы ротора 9, через воздушный зазор 3 проникает в зубцы статора 2, проходит через станину 1 в осевом направлении, а затем через подшипниковый щит 6 и воздушный зазор 7 снова входит во втулку. Потоки $Ф_в$, созданные каждой катушкой обмотки возбуждения 5, направлены так, что в зубцах статора и ротора они имеют одинаковое направление, а в статоре машины и втулке ротора – встречное. При вращении ротора поток, проходящий через каждый зубец статора, будет изменяться, так как магнитное

сопротивление этому потоку меняется в зависимости от того, что находится против зубца статора – зубец или паз ротора. В результате этого изменения в катушках обмотки, заложенной в пазах статора, будет индуцироваться ЭДС.

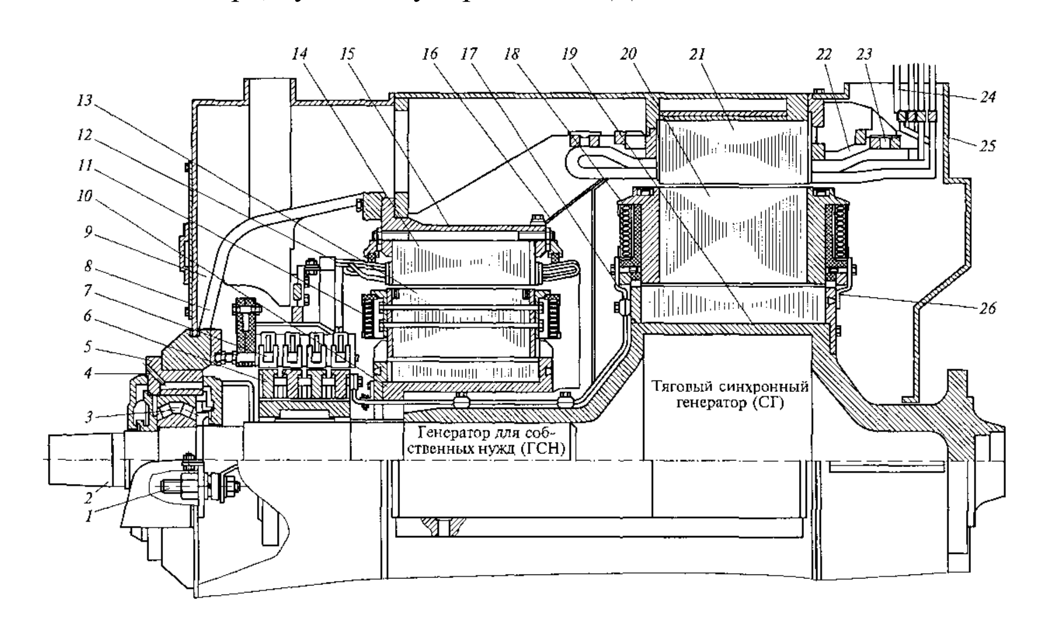



Рис. 13.2. Тяговый агрегат.
1 – выводы обмоток возбуждения ГСН и тягового СГ; 2 – вал; 3 – подшипник; 4 – атмосферный канал; 5 – втулка подшипника; 6 – контактное кольцо; 7 – щетки; 8 – подшипниковый щит; 9 – кожух; 10 – крепление полюсов ГСН; 11– обмотка возбуждения ГСН; 12– выводы статорной обмотки; 13 – сердечник полюса ГСН; 14 – сердечник статора ГСН; 15 – статор ГСН; 16 – кожух; 17– выводы обмотки возбуждения тягового СГ; 18– обмотка возбуждения СГ; 19 – общий барабан ротора; 20 – сердечник полюса СГ; 21 – сердечник статора СГ; 22, 24 – выводы статорной обмотки тягового СГ; 23 – крепление выводов тягового СГ; 25 – кожух; 26 – нажимная шайба.

*Таблица 13.2. Технические характеристики индукторных генераторов вагонов.*

| Параметры | Типы генераторов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2ГВ-003 | ГСВ-2, ГСВ-8 | ОСС-4435 | 2ПВ-001 |
| Длительная номинальная мощность, кВА | 9,45/0,75* | 5,8/2,2* | 35 | 30 |
| Длительная номинальная мощность на выходе выпрямителя, кВт | 8 | 5,5 | 30 | 26 |
| Номинальное напряжение, В | 45/24* | 48/15* | 150 | 150 |
| Номинальный ток, А | 121/31* | 70/85* | 155 | 135 |
| Диапазон рабочей частоты вращения, об/мин | 1000...4 000 | 1000...4 000 | 1000...3 400 | 550...3 000 |
| Диапазон изменения частоты тока, Гц | 100...400 | 100...400 | 200...680 | 100...400 |
| Масса, кг | 260 | 200 | 720 | – |

* В числителе приведены значения параметров для основной обмотки якоря, в знаменателе – для вольтодобавочной обмотки

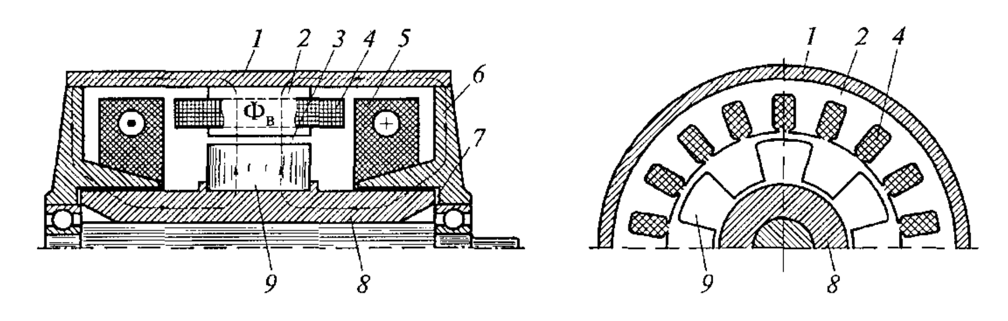



Рис. 13.3. Принцип работы индукторного генератора переменного тока:
1 – станина, 2 – зубец статора, 3, 7 – воздушные зазоры, 4 – обмотка статора;
5– обмотка возбуждения, 6 – подшипниковый щит, 8 – втулка ротора,
9 – зубец ротора.

**Устройство.** Генераторы переменного тока 2ГВ-003 и ГСВ представляют собой двенадцатиполюсные машины закрытого исполнения. Корпус 1 генератора (рис. 13.4) имеет лапы 2 или плиту для монтажа генератора под вагоном или на тележке и ребра для воздушного охлаждения машины. Сердечник статора 9 выполнен из листов электротехнической стали, изолированных лаковой пленкой, и запрессован в корпус. Статор имеет 18 пазов, в которые уложены обмотки 5 и 6 (основная трехфазная и вольтодобавочная либо однофазная и трехфазная). Выводы от обмоток подключены к зажимам панели, установленной в клеммной коробке 3. Подшипниковые щиты 4 и 13, имеющие снаружи ребра для охлаждения, крепятся к корпусу болтами. Кольцевые приливы щитов служат для установки двух пар последовательно соединенных катушек параллельной 12 и последовательной 11 обмоток возбуждения. Сердечник 10 ротора собран из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга, и имеет шесть зубцов, т. е. 12 полюсов. Он запрессован на втулку 7, укрепленную на валу 8. Втулка 7 ротора является частью магнитопровода генератора и должна иметь достаточно большое сечение. Кольцевые приливы подшипниковых щитов 4 и 13 также имеют развитую поверхность, так как через них проходит магнитный поток возбуждения. Генераторы 2ГВ и ГСВ различных модификаций имеют примерно однотипную конструкцию и отличаются устройством узла подвески генератора к вагону, конструкцией подшипниковых узлов, расположением и количеством обмоток возбуждения, способом крепления ротора. Генератор 2ПВ-001 представляет собой двухмашинный агрегат, состоящий из индукторного генератора и приводного электродвигателя, смонтированных в общем корпусе и имеющих общий вал. Конструкция генератора подобна генератору 2ГВ-003: ротор имеет восемь зубцов, т.е. 16 полюсов; на статоре расположена трехфазная обмотка, соединенная в звезду. Приводной электродвигатель – асинхронный с короткозамкнутым ротором. На вагонах-электростанциях установлены синхронные генераторы ГСФ-200 трехфазного тока с явно выраженными полюсами. Генератор имеет следующие номинальные значения параметров: мощность 250 кВА, напряжение 440/230 В, ток 360 А, КПД 0,92, частота тока 50 Гц, частота вращения 1500 об/мин, коэффициент мощности 0,8. В синхронных генераторах ГСФ-200 в отличие от генераторов постоянного тока трехфазная обмотка статора (ее фазы в виде трех катушек *AX*, *BY*, *CZ*, сдвинутых в пространстве на 120 эл. град.) расположена на статоре, а обмотка возбуждения – на роторе. Постоянный ток для питания обмотки возбуждения подается из цепи статора через полупроводниковый выпрямитель с помощью контактных колец и щеток. В генераторе осуществляется принцип самовозбуждения, как и в генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением. При вращении ротора магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, пересекает проводники обмотки статора и при холостом ходе машины индуцирует в каждой фазе обмотки статора переменную ЭДС. Синхронные генераторы вагонов-электростанций приводятся во вращение от дизеля и работают при постоянной частоте вращения. Поэтому напряжение генератора изменяется только в результате изменения его нагрузки.

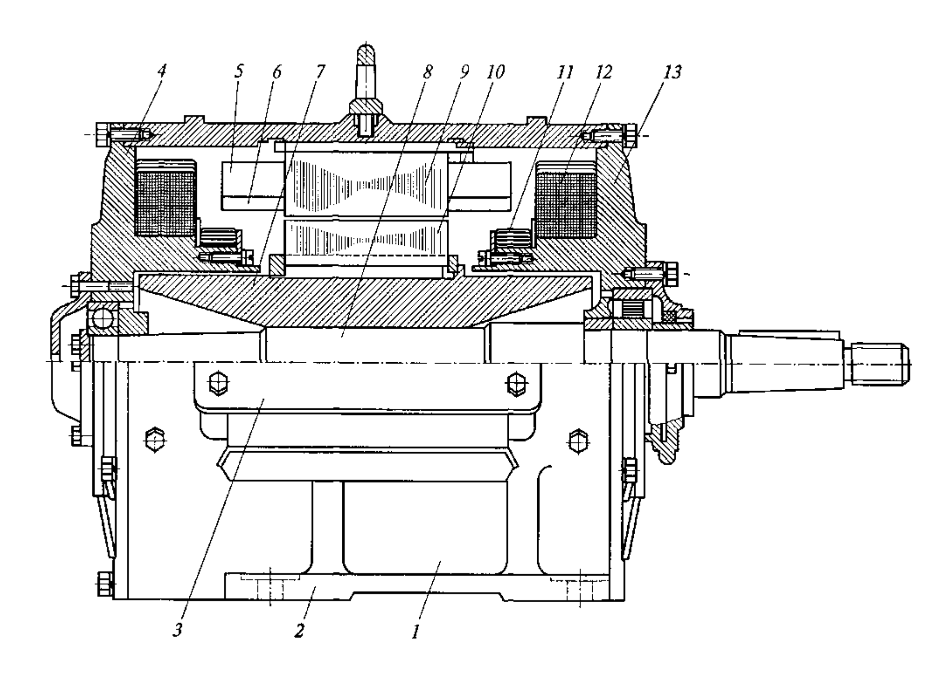



Рис. 13.4. Устройство генератора 2ГВ-003.
1 – корпус; 2 – лапы; 3 – клеммная коробка; 4, 13 – подшипниковые щиты;
5, 6 – обмотки статора; 7 – втулка; сердечник статора; 10 – сердечник ротора;
11 – последовательная обмотка возбуждения; 12 – параллельная обмотка
1 статора; 7 – втулка; 8 – вал; 9 параллельная обмотка возбуждения.

Для поддержания стабильности напряжения синхронных генераторов при изменении нагрузки на вагонах-электростанциях применяют регуляторы напряжения РНГ. Место установки генератора на вагоне определяется в основном его мощностью, габаритными размерами и конструкцией провода. Генераторы вагонов без кондиционирования воздуха имеют малую мощность (до 10 кВт), относительно небольшие габаритные размеры и массу и располагаются под кузовом вагона на его раме или на продольной или поперечной балке тележки. Генераторы вагонов с кондиционированием воздуха имеют мощность 20...32 кВт и значительную массу, поэтому место их установки может оказать существенное влияние на равномерное распределение массы вагона на колесные пары. Как правило, их подвешивают под кузовом вагона в средней его части, укрепляя на хребтовой балке.

Вагонные генераторы работают при значительно изменяющейся нагрузке. Ввиду того, что генераторы расположены под вагонами, их выполняют закрытыми и охлаждают путем обдува потоком встречного воздуха. В некоторых машинах роль вентилятора играют вентиляционные лопасти, смонтированные в торцовой части сердечника якоря. Для увеличения поверхности охлаждения корпуса генераторы снабжают наружными охлаждающими ребрами. В генераторах мощностью 20... 30 кВт, устанавливаемых на вагонах с кондиционированием воздуха, используют дополнительные способы охлаждения. Так, на генераторах типа K694L применяют наружный вентилятор с обтекателем, обдувающий внешнюю поверхность корпуса для более интенсивного отвода теплоты. В агрегатах типа DUGG-28B машина охлаждается потоком воздуха, забираемого по воздуховоду из вагона. Воздух для охлаждения генератора предварительно фильтруется в приемных жалюзи. В зимнее время охлаждение генератора воздухом, забираемым из вагона, не допускается. При эксплуатации корпус вагонных генераторов и другие детали подвергаются действию резких изменений температуры. В результате этого в неработающем генераторе температура может достигать значений, при которых из воздуха, находящегося внутри машины, выпадает конденсат (точка росы). Для удаления конденсата в нижней части корпуса машины имеются сливные пробки.

## 13.4. Асинхронные тяговые двигатели.

В настоящее время силовая полупроводниковая техника и средства автоматики позволяют создавать надежные и экономичные статические преобразователи частоты с приемлемыми для локомотивов размерами и массой. Благодаря этому появилась практическая возможность использовать в локомотивах передачу мощности переменного тока с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями. Проблема в том, что при использовании тяговых электродвигателей постоянного тока для тепловозов с дизелями мощностью более 2940 кВт в секции приходится существенно усложнять их конструкцию. Асинхронный тяговый электродвигатель ЭД900 предназначен для опорно-рамной подвески (рис. 13.5). Здесь следует заметить, что в тяговых машинах переменного тока магнитопровод выполняемый из листов электротехнической стали, закрепляется в корпусе статора. Толщина стенок корпуса определяется из условий прочности и сопряжения с другими частями машины: подшипниковыми щитами, деталями воздуховодов и др. Литой цилиндрический корпус 8 электродвигателя ЭД900 имеет внутренние осевые ребра жесткости, образующие каналы для прохода охлаждающего статор воздуха. Для входа и выхода воздуха двигатель имеет два люка. Выходной люк в патрубке 9 снабжен кожухом, который защищает двигатель от влаги и пыли. Независимая воздушная система охлаждения двигателя направляет воздух двумя параллельными потоками: через воздушные каналы между стальным пакетом сердечника 7 статора и корпусом 8 и через два ряда круглых отверстий в сердечнике 5 ротора. Воздушный зазор между статором и ротором составляет 1,5 мм.

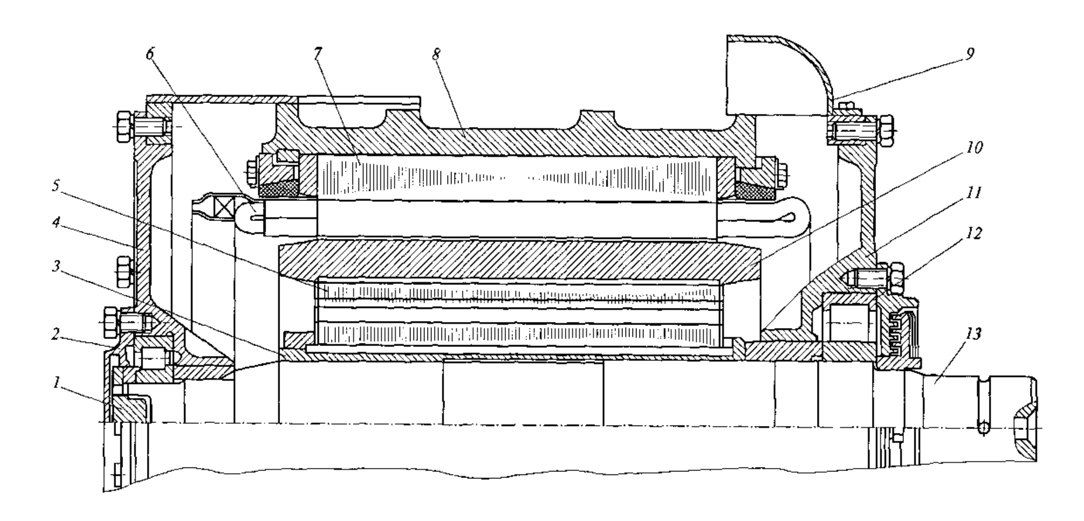



Рис 13.5. Асинхронный тяговый двигатель ЭД900.
1 – стопорная шайба; 2 – крышка подшипника; 3 – втулка ротора;
4, 11 – подшипниковые щиты; 5 – сердечник ротора; 6 – обмотка статора;
7 – сердечник статора; 8 – корпус двигателя; 9 – воздушный патрубок;
10 – стержень «беличьей клетки» ротора; 12 – подшипник; 13 – вал.

Пакет сердечника 7 статора набирают из листов электротехнической стали на специальные призмы и закрепляют нажимными шайбами. Двухслойную петлевую обмотку 6 статора укладывают в пазы сердечника 7 статора, закрепляют в них изоляционными клиньями и затем выполняют пропитку и сушку. Лобовые части обмотки 6 статора закрепляют конусными кольцами. Статор с уложенной в него обмоткой обтачивают по призмам и запрессовывают в корпус. Обмотка статора изолирована от корпуса полиамидной пленкой. На вал электродвигателя напрессовывают втулку 3 в виде трубы, а на нее напрессовывают сердечник 5 ротора, набранный из листов электротехнической стали. Короткозамкнутая обмотка ротора выполнена в виде «беличьей клетки» путем заливки пазов и торцов сердечника алюминиевым сплавом. Пазы ротора имеют полуовальную полузакрытую форму. Конструкция подшипниковых узлов 12 подобна подшипниковым узлам тяговых

электродвигателей постоянного тока. Механическая характеристика асинхронного двигателя жесткая, такую же характеристику имеет двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Однако перегружаемость двигателя постоянного тока ограничивается нагреванием и коммутацией, а асинхронного двигателя развиваемым максимальным моментом. Поэтому у асинхронного двигателя допускаемая перегрузка ограничивается той частью характеристики, которая обусловливает устойчивую работу.

### 13.5. Управление частотой вращения вала и реверсирование асинхронного двигателя.

Из формулы для определения частоты вращения ротора асинхронного двигателя:

$$n_2 = n_1(1 - s) = 60f / p\ (1 - s) \quad (13.1)$$

следует, что изменить частоту вращения ротора можно путем изменения одной из трех величин: частоты напряжения питания, скольжения ротора или числа пар полюсов. Регулирование скорости изменением частоты напряжения питания. Регулирование основано на изменении частоты вращения поля статора и в этом случае получается плавным и в широких пределах. Однако для изменения частоты $f$ необходимо иметь преобразователь частоты, так как частота питающей сети постоянна. В результате установка становится сложной и дорогостоящей. Тем не менее, этот способ является основным при регулировании скорости объектов подвижного состава, имеющих тяговый привод с асинхронными тяговыми электродвигателями. Частотное управление асинхронным двигателем осуществляется одновременным изменением ряда параметров питающей сети. Для обеспечения экономичного регулирования текущие значения напряжения $U_1$ частоты тока $f$ и вращающего момента $M_1$ должны находиться в следующем соотношении с номинальными значениями $U_{ном}$, $f_{ном}$, $M_{ном}$: $U_1/U_{ном} = (f/f_{ном})\sqrt{M_1/M_{ном}}$ (13.2)

При этом обеспечиваются заданные значения перегрузочной способности асинхронного тягового двигателя, КПД и коэффициента мощности. При $M_1 = M_{ном}$ регулирование напряжения осуществляется в соответствии с зависимостью $U_1 = k_1 f$, так как:

$$U1/U_{ном} = f/f_{ном} = \text{const} \quad (13.3)$$

$$U1/f = U_{ном}/f_{ном} = \text{const} \quad (13.4)$$

При постоянной мощности асинхронного тягового двигателя регулирование осуществляется в соответствии с зависимостью $U_1 = k_2\sqrt{f}$, где $k_1$ и $k_2$ – конструктивные коэффициенты. Поскольку $P = M_1 f = M_{ном} f_{ном} = \text{const}$, то: $M_{ном}/M_1 = f/f_{ном}$ и $U_1/U_{ном} = \sqrt{f/f_{ном}}$ (13.5) При частотном управлении можно придать тяговым характеристикам тепловоза $F_T = f(v)$ любую желаемую форму (рис. 13.6) и обеспечить заданную скорость движения. Необходимые соотношения параметров регулирования приведены в табл. 13.3. Таким образом, при изменении частоты вращения в широком диапазоне необходимо изменять магнитный поток машины. В случаях поддержания постоянной мощности асинхронного тягового двигателя магнитный поток его должен уменьшаться с увеличением питающего напряжения. На тепловозах с передачами переменно-постоянно-переменного тока с целью наиболее полного использования установленной мощности электрооборудования принято трехзонное управление асинхронными тяговыми двигателями.

В зоне I (см. рис. 13.6) поддерживается постоянная сила тяги $F_T$ электродвигателя, работающего при максимальном магнитном потоке. Линейное напряжение $U_1$ и частота $f$ тока статора по мере увеличения частоты вращения ротора $n_2$ возрастают. Зона управления заканчивается при достижении ограничения по мощности дизеля.

В зоне II асинхронный тяговый двигатель работает с постоянной мощностью $P_2$ ограниченной мощностью дизель-генератора. В этой зоне ток статора и магнитный поток уменьшаются с увеличением скорости движения тепловоза, частота тока ротора $f_2$ уменьшается только в начале зоны II, а потом остается постоянной.

В зоне III напряжение $U_1$ остается постоянным. Для поддержания постоянной мощности электродвигателя, работающего в этой зоне с ослабленным магнитным потоком, частота тока ротора $f_2$ увеличивается по мере увеличения $f$.

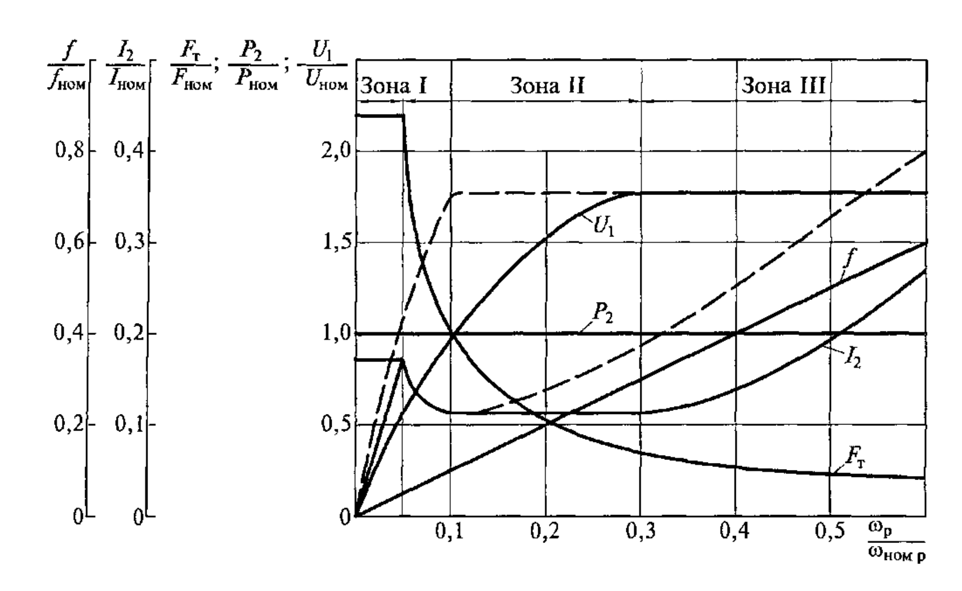



Рис. 13.6. Зависимости напряжения питания ($U_1$), мощности ($P_2$), частоты ($f$), силы тяги ($F_T$) от частоты вращения ротора ($\omega_р$) асинхронного тягового двигателя

В зоне I (см. рис. 13.6) поддерживается постоянная сила тяги $F_T$ электродвигателя, работающего при максимальном магнитном потоке. Линейное напряжение $U_1$ и частота $f$ тока статора по мере увеличения частоты вращения ротора $n_2$ возрастают. Зона управления заканчивается при достижении ограничения по мощности дизеля.

В зоне II асинхронный тяговый двигатель работает с постоянной мощностью $P_2$ ограниченной мощностью дизель-генератора. В этой зоне ток статора и магнитный поток уменьшаются с увеличением скорости движения тепловоза, частота тока ротора $f_2$ уменьшается только в начале зоны II, а потом остается постоянной.

В зоне III напряжение $U_1$ остается постоянным. Для поддержания постоянной мощности электродвигателя, работающего в этой зоне с ослабленным магнитным потоком, частота тока ротора $f_2$ увеличивается по мере увеличения $f$.

*Таблица 13.2. Зависимость режимов двигателя от параметров питающей сети.*

| Режим | Параметры | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $M_1 / M_{ном}$ | $U_1 / U_{ном}$ | $P_1 / P_{ном}$ | $\Phi_1 / \Phi_{ном}$ | $I_1 / I_{ном}$ |
| Постоянной мощности $M_1 = M_{ном} (f/f_{ном})$ | $f_{ном} / f$ | $\sqrt{f / f_{ном}}$ | const | $\sqrt{f_{ном} / f}$ | $\sqrt{f_{ном} / f}$ |
| Постоянного момента $M_1 = M_{ном}$ = const | const | $f / f_{ном}$ | $f / f_{ном}$ | const | const |

**Регулирование скорости изменением скольжения**. Существуют два способа такого регулирования: изменением подводимого к обмотке статора напряжения и изменением активного сопротивления цепи ротора. Возможность регулирования частоты вращения асинхронных двигателей изменением напряжения питания $U_1$ подтверждается графиками $M = f(s)$ (см. рис. 4.8). При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение напряжения питания вызывает увеличение частоты вращения ротора. Однако диапазон регулирования скорости получается небольшой, что объясняется следующим:

• узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченной величиной критического скольжения;

• недопустимостью значительного отклонения напряжения от номинального значения: с повышением $U_1$ сверх номинального значения возникает опасность чрезмерного перегрева двигателя в результате увеличения электрических и магнитных потерь, а при значительном уменьшении $U_1$ сильно уменьшается перегрузочная способность двигателя.

Изменение подводимого к двигателю напряжения питания осуществляется либо

регулировочным автотрансформатором, либо с помощью реакторов, включаемых в разрыв цепи статора. Из-за узкого диапазона регулирования и неэкономичности (необходимость дополнительных устройств) рассматриваемый способ регулирования скорости не получил широкого распространения. Увеличение скольжения двигателя сопровождается ростом электрических потерь в цепи ротора, а следовательно, и снижением КПД двигателя. Так, например, если при $M_2$ = const увеличить скольжение двигателя от 0,02 до 0,5, что соответствует уменьшению частоты вращения ротора приблизительно вдвое, то потери в цепи ротора составят половину всей электромагнитной мощности двигателя. Это свидетельствует о неэкономичности данного способа регулирования. Рассматриваемый способ регулирования имеет еще и тот недостаток, что участок механической характеристики, соответствующий устойчивой работе двигателя, при введении в цепь ротора сопротивления становится более пологим.

**Регулирование скорости изменением числа полюсов обмотки статора**. Этот способ обеспечивает ступенчатое регулирование, например при $f$ = 50 Гц и значениях $p$ от 1 до 6 можно получить следующие значения частоты вращения поля $n_1$: 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/мин и т. д. Изменять число пар полюсов в обмотке статора двигателя можно либо укладкой на статоре двух обмоток с разным числом пар полюсов, либо укладкой на статоре одной обмотки с отводами, конструкция которой позволяет получить в двигателе различное число пар полюсов. Комбинация этих способов дает возможность получить двигатели с большим числом ступеней регулирования. Наиболее простой получается обмотка при переключении полюсов в отношении 1:2.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением числа пар полюсов статорной обмотки применяется главным образом в двигателях с короткозамкнутым ротором. Это объясняется тем, что число полюсов короткозамкнутого ротора всегда равно числу полюсов обмотки статора. Поэтому для изменения скорости двигателя достаточно ограничиться переключением статорной обмотки. Если же двигатель имеет фазный ротор, то наряду с переключением обмотки статора необходимо соответствующим образом переключить и обмотку ротора. Многоскоростной асинхронный двигатель в зависимости от вида нагрузки на валу может работать в одном из двух режимов:

• при переключении двигателя с одной частоты вращения на другую вращающий момент $M_2$ остается неизменным, а мощность изменяется пропорционально частоте вращения ротора $n_2$ (двигатель постоянного момента);

• при переключении двигателя с одной частоты вращения ротора на другую мощность $P_2$ остается неизменной, а момент $M_2$ изменяется соответственно изменению частоты вращения (двигатель постоянной мощности). Тот или иной режим работы двигателя обеспечивается применением различных схем соединения статорных обмоток.

Многоскоростные двигатели с переключением полюсов обмотки статора по сравнению с обычными двигателями имеют недостатки, которые в основном сводятся к следующим: большие габариты, высокая стоимость, наличие громоздкого многоконтактного переключающего устройства. Из изложенного следует, что все применяемые способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей обладают существенными недостатками. Направление вращения асинхронного двигателя определяется направлением вращения магнитного поля, а последнее зависит от порядка чередования фаз в обмотке статора. Изменение направления вращения происходит при взаимном переключении любых двух фаз.

Контрольные вопросы:

1. На какой ток рассчитывается каждая фаза синхронного генератора?
2. Можно ли производить пуск дизеля тепловоза от синхронного тягового генератора?
3. С какой целью на синхронном тяговом двигателе тепловозов применяют две трехфазные обмотки статора?
4. Какие достоинства имеет синхронный тяговый двигатель? Будет ли его эксплуатация на локомотивах дешевле по сравнению с двигателями постоянного тока?

5. Укажите особенности работы асинхронных двигателей на локомотивах.
6. Как обеспечивается формирование тяговой характеристики локомотива с асинхронными тяговыми двигателями?
7. Назовите способы регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

## Глава 14.
## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.
### 14.1. Условия работы вспомогательных электрических машин.

Вспомогательные электрические машины переменного тока, устанавливаемые на подвижном составе, имеют специальное исполнение. Асинхронные трехфазные вспомогательные двигатели тепловозов и электровозов должны нормально работать в следующих условиях:
• при отклонении напряжения питания от номинального (-25...+15%) и одновременной асимметрии напряжений;
• при затяжных и повторных пусках при пониженном напряжении;
• при вибрации и толчках;
• при температуре окружающего воздуха от -50 до +50°С и относительной влажности воздуха до 95%.

С повышением напряжения в асинхронном двигателе увеличиваются магнитный поток и реактивная мощность, в связи с чем понижается коэффициент мощности, возрастают потери в стали сердечников и меди обмоток. Одновременно понижаются рабочие токи в фазах. При понижении напряжения и неизменной нагрузке на валу увеличиваются активные составляющие токов статора и ротора. Скольжение двигателя при изменении напряжения питания изменяется примерно обратно пропорционально квадрату напряжения. Величина напряжения оказывает значительное влияние на механическую характеристику двигателя. Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, поэтому с уменьшением напряжения снижаются пусковой и максимальный моменты двигателя, а также его устойчивость к опрокидыванию. Поэтому необходимо, чтобы вращающий момент выбранной машины обеспечивал работоспособность механизма при низшем напряжении. При питании асинхронных трехфазных двигателей от расщепителя фаз они работают в несимметричном режиме. Несимметрия приложенного напряжения вызывает несимметрию токов в фазах двигателя. Пусковой ток двигателя вызывает добавочное падение напряжения в обмотках расщепителя фаз и трансформатора, снижая напряжение питания двигателя и его устойчивость. Изменение характеристики вращающего момента зависит от кратности пускового тока двигателя, сопротивления обмоток расщепителя фаз и обмотки собственных нужд трансформатора. При недостаточном запасе устойчивости приводные двигатели могут «опрокидываться» во время пуска одного из двигателей.

### 14.2. Синхронный возбудитель ВС-650ВУ2.

На тепловозах 2ТЭ116, ТЭП70 и ТЭМ7 для питания обмотки возбуждения тягового генератора используется синхронный генератор однофазного напряжения (возбудитель) ВС-650ВУ2 (рис. 14.1). Это электрическая машина переменного тока, независимого возбуждения, защищенного исполнения, самовентилируемая и с одним свободным концом вала. Возбудитель состоит из станины 11, ротора, подшипниковых щитов 8 и 20, подшипников 4 и щеткодержателей 7. Кроме того, он имеет четыре вывода обмоток: два вывода обмотки, расположенной на роторе, и два вывода обмотки возбуждения, расположенной на статоре. Станина 11 возбудителя, являющаяся одновременно магнитопроводом и основой для сборки всех узлов, изготовляется из листового проката путем гибки и сварки. В нижней его части имеются лапы для установки. В торцах станины выполнена расточка для посадки подшипниковых щитов. На наружной стороне станины расположена клеммная коробка, представляющая собой панель из прочного

электроизоляционного материала, на которой закреплены штифты. Выводы обмоток и монтажные провода электрической схемы тепловоза подсоединяются к этим штифтам винтовым соединением. Полюс возбудителя состоит из сердечника, двух обмоток независимого возбуждения и демпферной обмотки, встроенной в башмак сердечника полюса в виде стержней, соединенных в лобовых частях шиной. Катушка независимого возбуждения изготовлена из прямоугольного обмоточного медного провода и вместе с сердечником полюса образует неразъемный моноблок на основе изоляции типа «Монолит-2». Шесть щеткодержателей (по три на каждое контактное кольцо) закреплены с помощью уголков из специального сплава на выполненной из изоляционного материала траверсе, соединенных между собой токосборными шинами. Подшипниковые щиты 8 и 20 предназначены для опоры и центровки ротора относительно магнитной системы станины через вмонтированные в них подшипники качения. Щиты центрируют в станине 11 «замками» и закрепляют в ней болтами. Подшипник 4 и его смазочная камера закрываются лабиринтным кольцом 2, предотвращающим вытекание смазки из подшипника наружу. Смазка добавляется в подшипники с помощью шариковых масленок, закрепленных в смазочных трубках на наружной поверхности подшипниковых щитов. Ротор 12 возбудителя состоит из вала 23, сердечника, обмоткодержателей, контактных колец 10, втулки 19 для крепления вентилятора 18 и обмотки ротора 13, состоящей из отдельных катушек. Система вентиляции включает в себя вентилятор, вентиляционные каналы в роторе и магнитной системе (межполюсные пространства и зазоры между полюсами и ротором), а также люки в станине, защищенные крышками с вентиляционными отверстиями в нижней части. Охлаждающий воздух поступает через отверстия в крышках люков со стороны контактных колец, проходит параллельными потоками по вентиляционным каналам и выбрасывается наружу через сетку со стороны привода.

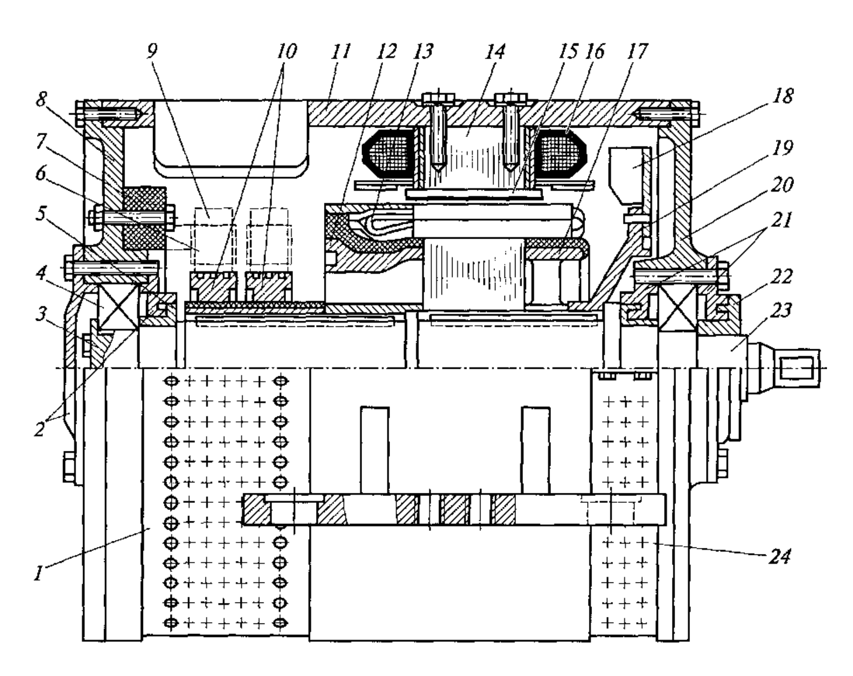



Рис. 14.1. Синхронный возбудитель ВС-650ВУ2.
1, 24 – вентиляционные решетки; 2, 21 – уплотнительные кольца; 3 – нажимная шайба; 4 – подшипник; 5, 22 – лабиринтные кольца; 6 – щеткодержатель; 7– изолятор щеткодержателя; 8, 20– подшипниковые щиты; 9 – щетка; 10 – контактные кольца; 11 – станина; 12 – ротор; 13 – обмотка ротора; 14 – сердечник полюса статора; 15– башмак сердечника полюса; 16 – обмотка статора; 17, 19– втулки вентилятора; 18 – вентилятор; 23 – вал.

Синхронный подвозбудитель ВС-652 устанавливается на тепловозах 2ТЭ10Л, -ЮМ, ЗТЭ10М, М62, 2М62, ТЭП60, 2ТЭП60 и питает переменным напряжением рабочие цепи

магнитного усилителя и трансформаторов в системе возбуждения возбудителя тягового генератора. Подвозбудитель является однофазной четырехполюсной электрической машиной защищенного исполнения с самовентиляцией. Его параметры: мощность 1,1 кВА, напряжение 110В, ток 10А, частота вращения 4000 об/мин.

### 14.3. Электродвигатели привода собственных нужд.

Для привода вспомогательных механизмов на тепловозах и электровозах могут применяться самые разные типы электродвигателей:
• двигатели, питающиеся от полупроводниковых выпрямителей;
• однофазные коллекторные двигатели;
• асинхронные конденсаторные двигатели;
• асинхронные однофазные двигатели с пусковой фазой;
• асинхронные трехфазные двигатели с питанием от расщепителя фаз;
• асинхронные трехфазные двигатели с питанием от синхронного генератора промышленной или повышенной частоты. Однако наибольшее распространение получили электродвигатели, представленные в табл. 14.1.

*Таблица 14.1. Параметры электродвигателей привода собственных нужд тепловоза.*

| Наименование параметра | Тип электродвигателя | | |
|---|---|---|---|
| | 4АЖ225 | АОС2-62-6-100 | МВ-11 |
| Мощность, кВт | 24 | 7 | 24 |
| Напряжение, В | 240...560 | 240...560 | 240...560 |
| cosφ | 0,89 | 0,85 | 0,7 |
| Частота, Гц | 35...100 | 35...100 | 35...100 |
| Частота вращения, об/мин | 1980 | 1980 | 1980 |
| кпд | 0,82 | 0,85 | 0,83 |
| Класс изоляции | Н | F | Н |
| Масса, кг | 269 | 173 | 257 |

Эти электродвигатели выполнены на базе общепромышленной серии асинхронных двигателей А2-82-6 и АОС2-62-6 на частоту 100 Гц и отличаются от серийных усовершенствованной системой лабиринтов и системой пополнения смазки. Все электродвигатели асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором.

**Мотор-вентилятор МВ-11.** На тепловозе 2ТЭ116 для привода вентиляторов охлаждения холодильной камеры используют асинхронные электродвигатели специального исполнения (рис. 14.2). Мотор-вентилятор вертикального исполнения представляет собой асинхронный двигатель с внешним ротором, встроенный в корпус осевого вентилятора. В ступице основания 20 закреплена шестью болтами втулка, на которую напрессован сердечник 16 статора с обмоткой 15. Сердечник статора удерживается на втулке кольцевой шпонкой. В сжатом положении железо сердечника фиксируется между нажимными шайбами полукольцами. Внутри втулки установлен вал ротора на двух подшипниках: верхний №313 и нижний № 310. Верхний подшипник имеет лабиринтные крышки и закреплен на валу ротора гайкой, нижний – удерживается кольцом на торце вала. Вентиляторное колесо с запрессованным в его корпус сердечником ротора 5 насаживается сверху статора и крепится болтами к верхнему торцу вала 11. Наружный воздух, засасываемый лопатками вентиляторного колеса через боковые жалюзи, проходит через секции холодильной камеры и выбрасывается через выходной коллектор вентилятора холодильной камеры. Мотор-вентилятор охлаждается наружным воздухом, который подается по трубам, прикрепленным фланцем к опоре выходного коллектора. Затем через отверстия в опоре и основании мотор-

вентилятора часть охлаждающего воздуха омывает поверхности ротора и статора с обмоткой 75, а часть его проходит через двенадцать каналов диаметром 30 мм в сердечнике 76 статора и выбрасывается наружу через патрубки вентиляторного колеса. Сердечник статора мотор-вентилятора набирают из штампованных листов электротехнической стали марки Э21 толщиной 0,5 мм. Листы изолированы друг от друга лаком К47. Обмотка статора трехфазная, двухслойная, симметричная. Фазы соединены в звезду. Катушки обмотки имеют по пять витков и намотаны из провода ПСДК диаметром 1,45 мм. Катушечная группа состоит из четырех катушек. Выводы катушек соединены между собой в катушечные группы и припаяны к выводному кабелю сплавом МФ-3. Выводы выполнены кабелем РКГМ сечением 16 мм$^2$. Сердечник ротора набран из штампованных листов электротехнической стали 1311 и имеет 56 пазов под обмотку, расположенных по внутреннему краю листов. Пазы ротора залиты алюминиевым сплавом АКМ. Ротор после запрессовки в корпус вентиляторного колеса штифтуют четырьмя штифтами.

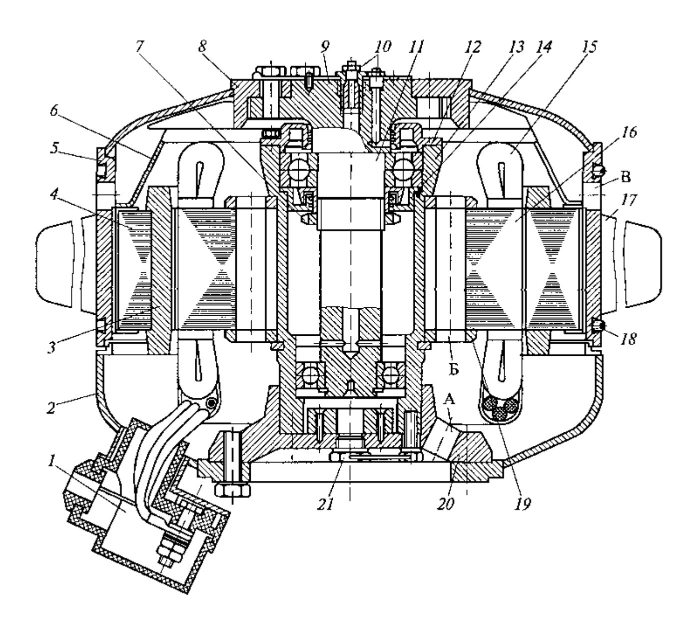



Рис. 14.2. Мотор вентилятр МВ-11.
1– коробка выводов; 2 – днище; 3 – алюминиевая заливка; 4 – сердечник ротора; 5 – корпус ротора; 6 – выходной коллектор; 7 – гайка; 8, 13 – втулки; 9, 12, 14 – крышки, 10 – масленки; 11 – вал; 15 – обмотка статора; 16 – сердечник статора; 17– лопатка вентилятора; 18– балансировочный груз; 19 – нажимная шайба; 20 – основание; 21 – пробка; А, Б, В – вентиляционные отверстия

### 14.4. Конструкция асинхронных электродвигателей.

**Электродвигатель 4АЖ225.** На тепловозе 2ТЭ116 для привода вентиляторов охлаждения тягового генератора, выпрямительной установки, тяговых электродвигателей передней и задней тележки используется двигатель 4АЖ225 (рис. 14.3). Эта асинхронная машина с короткозамкнутым ротором, закрытого исполнения выпускается специально для работы на тепловозах. Она имеет литые чугунные корпус 5 с опорами 76 для установки и подшипниковые щиты 4 и 10. Статор двигателя 4АЖ225 выполнен аналогично двигателю МВ-11. Сердечник 7 ротора набран из штампованных листов электротехнической стали 1311 и имеет 56 пазов под обмотку, расположенных по внутреннему краю листов. Пазы ротора залиты алюминиевым сплавом АКМ в виде «беличьей клетки», стержни которой удлинены и, выступая из паза, создают воздушный поток, необходимый для охлаждения обмоток статора и ротора. Дополнительно на валу 15 ротора напрессован осевой вентилятор 2. Вал ротора опирается на два шариковых подшипника, расположенных в переднем и заднем подшипниковых щитах. Фланец 12 служит для крепления электродвигателя к вентилятору.

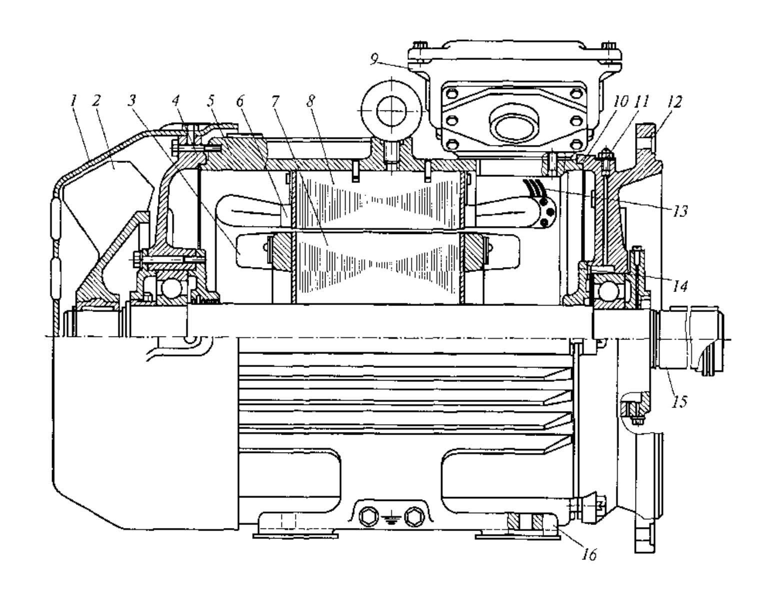



Рис. 14.3. Асинхронный двигатель 4АЖ225.
1 – защитный кожух; 2 – вентилятор; 3 – обмотка ротора; 4, 10 – подшипниковые щиты; 5 – корпус; 6 – обмотка статора; 7 сердечник ротора; 8 – сердечник статора;
9 – коробка выводов; 11 – масленка; 12 – фланец; 13 – выводы обмотки статора;
14 – уплотнитель; 15 – вал; 16 – опора.

**Электродвигатель АЭ92-402.** Для привода главных компрессоров и центробежных вентиляторов на электровозе ВЛ80 применяется двигатель АЭ92-402, который представляет собой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором стандартного исполнения (рис. 14.4). Электродвигатель допускает стоянку под током короткого замыкания или затяжной пуск продолжительностью не более 15 с при номинальном напряжении 380 В. Питание двигателя осуществляется от однофазной сети в системе с расщепителем фаз и постоянно включенными конденсаторами при колебании питающего напряжения сети в диапазоне 280...470 В и ассиметрии напряжения по фазам в соответствии с нормативно-технической документацией на поставку. Статор состоит из стальной сварной станины и сердечника 77, набранного из штампованных изолированных листов электротехнической стали 1212, покрытых лаком. Для заземления электродвигателя на лапах имеются специальные болты. Обмотка 14 статора – трехфазная, двухслойная, симметричная, фазы соединены в звезду. Для обмотки использован изолированный медный провод ПСД и изоляционные материалы класса В. Пазовая изоляция выполнена в виде коробочки и состоит из двух слоев гибкого слюдинита ГСС-I толщиной 0,2 мм, между которыми помещен один слой электрокартона ЭВ толщиной 0,2 мм. Сверху по нему проложен слой стеклолакоткани ЛСБ толщиной 0,2 мм. Чтобы не повредить изоляцию паза при укладке обмотки статора, в пазы кладут вкладыш из электрокартона толщиной 0,2 мм. Между слоями обмотки в пазу имеется прокладка из слюдинитокартона толщиной 0,6 мм, а под клином – прокладка из электрокартона ЭВ. При укладке обмоток лобовые части первых катушек обмотки каждой группы изолируют вполнахлеста двумя слоями стеклолакоткани ЛСБ толщиной 0,2 мм и одним слоем стеклоленты такой же толщины. Лобовые части остальных катушек изолируют по всей длине одним слоем стеклоленты вполнахлеста. Кроме того, в лобовых частях обмотки между группами катушек укладывают изолирующие междуфазовые прокладки из стеклослюдинитокартона толщиной 0,6 мм. Катушки в пазах статора закреплены пазовыми клиньями высотой 4,5 мм, изготовленными из текстолита Б. Соединения между группами катушек выполнены скруткой и соединены с выводными проводами медными хомутиками. Места соединений спаяны сплавом МФ-3. Выводные концы катушек изолированы стеклолакочулком. Изоляция соединений катушечных групп состоит из одного слоя вполнахлеста черной стеклолакоткани толщиной 0,2 мм, а изоляция соединений обмотки с выводными проводами – из одного слоя вполнахлеста той же стеклолакоткани и стеклоленты

толщиной ОД мм. Для выводов использованы провода КРПТ или ПРГ. На провода ПРГ по всей длине надеты линоксиновые трубки. Вывод прикреплен к лобовой части и стянут посредине на длине 250... 300 мм одним слоем ленты вразбежку в два жгута с тремя выводами в каждом. Для повышения вибростойкости головки каждой катушки стянуты стеклочулком, а соединения обмотки скреплены стеклолентой равномерно по окружности и в 10 –12 местах прикреплены к лобовым частям. Лобовые части обмотки статоров двигателей АП82-4 и АС82-4 крепят к бандажным кольцам.

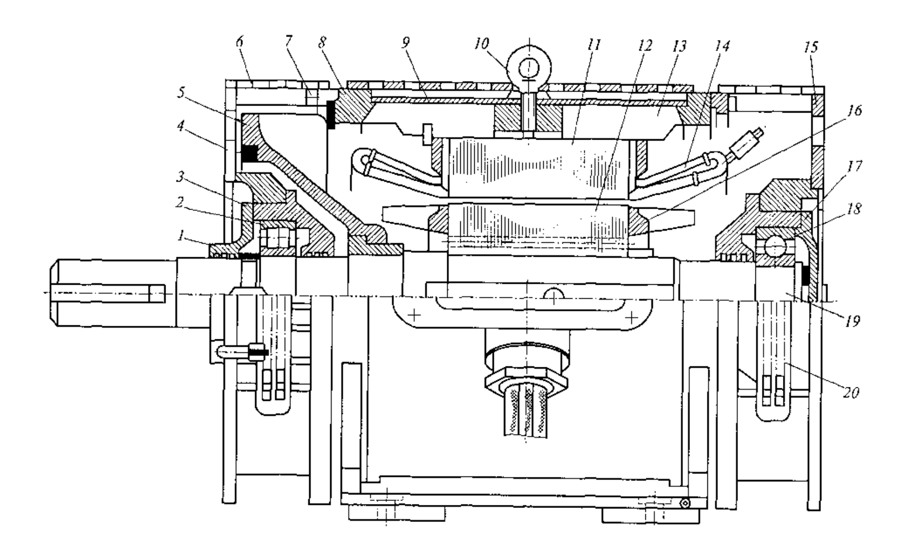



Рис. 14.4. Асинхронный двигатель АЭ92-402.
1 – лабиринтная крышка; 2, 18 – подшипники; 3 – корпус подшипника;
4, 15– подшипниковые щиты; 5 – вентилятор; 6 – сетка; 7 – болт; 8 – стопорное кольцо; 9 – обшивка станины; 10 – рым-болт; 11 – сердечник статора; 12 – сердечник ротора;
13– ребро станины; 14 – обмотка статора: 16 – стержень клетки ротора;
17 – крышка подшипника; 19 – вал; 20 – кожух.

Листы сердечника 12 ротора изготовляют из электротехнической стали 1212 и не покрывают изоляционной пленкой. Заливка пазов ротора вместе с торцовыми кольцами образует короткозамкнутую обмотку типа «беличьей клетки», выступающие концы стержней 16 которой служат вентилятором, охлаждающим двигатель. Посадка сердечника ротора на валу – прессовая со шпонкой. Сердечник снаружи покрыт лаком. Точность обработки наружной поверхности ротора ±0,06 мм, биение ее относительно поверхностей шеек вала под посадку подшипников не должно превышать 0,05 мм. Короткозамкнутый ротор залит алюминиевым сплавом АКЖ 16 и отбалансирован динамически. На валу 19 установлены подшипники качения: роликовый 70-2315КМШ (2) и шариковый 80-315Ш (18), заключенные в капсюли. Подшипниковые щиты 4 и 15 стальные, сварные. Встроенный вентилятор 5 отлит из алюминиевого сплава.

**Электронасос 4ТТ-63/10**. Для перекачивания трансформаторного масла в системе охлаждения тягового трансформатора электровоза ВЛ80 предназначен электронасос 4ТТ-63/10 (рис. 14,5). Он обеспечивает устойчивую работу при колебании напряжения питающей цепи в диапазоне 280...460 В и коэффициенте несимметрии напряжения до 10%. Допускается протекание тока короткого замыкания или затяжной пуск продолжительностью до 60 с при номинальном напряжении 380 В, а также работа в течение 2 ч при температуре прокачиваемого масла 95°С. Электронасос представляет собой агрегат, состоящий из трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором стандартного исполнения и одноступенчатого центробежного насоса. Он монтируется в одном блоке с тяговым трансформатором. Герметичность достигнута установкой резиновых уплотнений между всасывающим патрубком 1, задним подшипниковым щитом 17, панелью зажимов и корпусом 10, между шпильками выводов и клеммной коробкой. Пазы короткозамкнутого

ротора залиты алюминием. Пакет сердечника ротора 12 шихтован из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Вал электронасоса – полый, установлен на подшипниках 8 (тип 6306) и имеет консольную часть со стороны всасывающего патрубка 1. На консоль вала напрессовано рабочее колесо 4 насоса. Внутренняя полость электронасоса заполнена перекачиваемым трансформаторным маслом, которое, циркулируя, смазывает подшипники 8 ротора и отводит теплоту, выделяемую при работе электродвигателя.

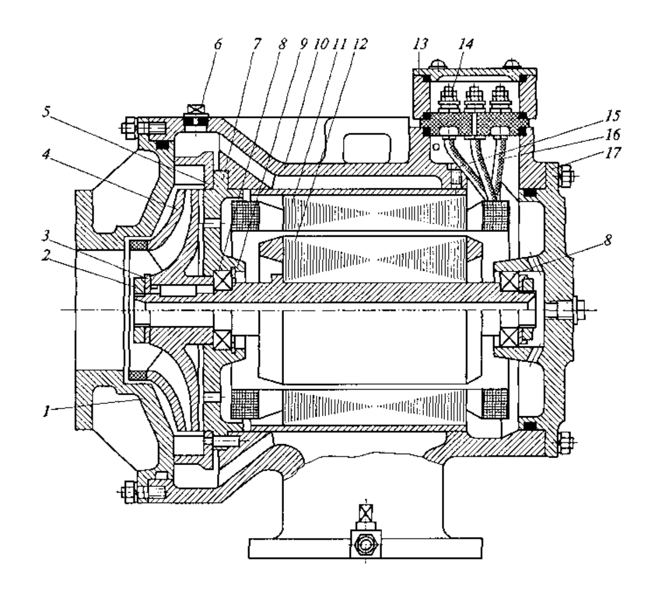



Рис. 14.5. Электронасос 4ТТ-63/10.
1 – всасывающий патрубок; 2 – гайка; 3 – стопорная шайба; 4 – рабочее колесо насоса;
5 – направляющий аппарат; 6 – пробка; 7, 17 – подшипниковые щиты;
8 – шариковый подшипник; 9 – стопорное кольцо; 10 – корпус; 11– статор;
12 – ротор; 13 – клеммная коробка; 14 – выводы;
15 – болт заземления; 16 – кабель.

### 14.5. Расщепитель фаз НБ-455А.

Для использования во вспомогательных машинах электровоза асинхронных двигателей (АД) необходимо преобразовать однофазный переменный ток в трехфазный. В качестве такого преобразователя широко используют асинхронный расщепитель фаз (РФ), представляющий собой асинхронную машину с несимметричной обмоткой статора (рис. 14.6).

**Принцип действия расщепителя фаз**. Принцип преобразования однофазного напряжения в трехфазное с помощью расщепителя фаз основан на свойстве вращающегося магнитного поля индуцировать в трехфазной статорной обмотке ЭДС, которая тоже будет трехфазной.

Обмотка статора РФ представляет собой несимметричную звезду с неодинаковым числом пазов на полюс и фазу и с разным числом витков в катушечных труппах. Две обмотки принадлежат одновременно двигателю и генератору, а третья – только генератору. Двигательная обмотка подключена к обмотке собственных нужд тягового трансформатора и предназначена для приведения во вращение ротора. Генераторная обмотка создает третью фазу и подключена к двигательной обмотке, но не в нулевой точке, а в точке, обеспечивающей наилучшую симметрию напряжений. Для разгона расщепителя фаз до номинальной частоты вращения применяется специальный конденсатор Сп или добавочное сопротивление, включенное с помощью контакта П между генераторной фазой и одним из концов двигательной фазы (асинхронный пуск). Так как пуск происходит на холостом ходу, то высокого пускового момента не требуется. По двигательной обмотке протекает однофазный переменный ток, и в его рабочем зазоре образуется не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле. Для получения сдвига фаз между токами генераторной и двигательной обмоток в цепь генераторной обмотки включается активное сопротивление.

Ток генераторной обмотки оказывается сдвинутым по фазе на некоторый угол по отношению к току двигательной обмотки. Этого сдвига достаточно для пуска и разгона ротора без нагрузки. Когда частота вращения ротора достигает 1430 об/мин, расщепитель фаз переходит в режим работы как однофазный асинхронный электродвигатель.

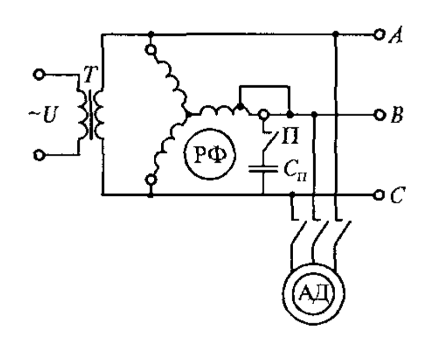



Рис. 14.6. Схема включения асинхронного электродвигателя, питающегося от расщепителя фаз.

Вращающееся магнитное поле, созданное токами двигательной обмотки и ротора, пересекает витки генераторной обмотки, наводя в ней ЭДС. Так как генераторная часть обмотки сдвинута в пространстве относительно двигательных обмоток на угол 120 эл. град., то ее ЭДС будет сдвинута на тот же угол. Чтобы обеспечить симметрию трехфазного напряжения при несимметричных падениях напряжения в отдельных фазах, обмотку статора выполняют несимметричной с разным количеством витков.

**Устройство расщепителя фаз НБ-455А.** Расщепители фаз устанавливаются по одному в каждой секции электровоза и работают раздельно. Расщепители фаз НБ-455 и НБ-455А выполнены на базе расщепителя фаз НБ-453А (рис. 14.7) и предназначены для преобразования однофазного напряжения обмотки собственных нужд тягового трансформатора в трехфазную систему с линейным напряжением 380 В. Нормальная работа РФ обеспечивается при колебаниях напряжения питающей цепи в диапазоне 280...460 В, исполнение – защищенное с самовентиляцией, горизонтальное.

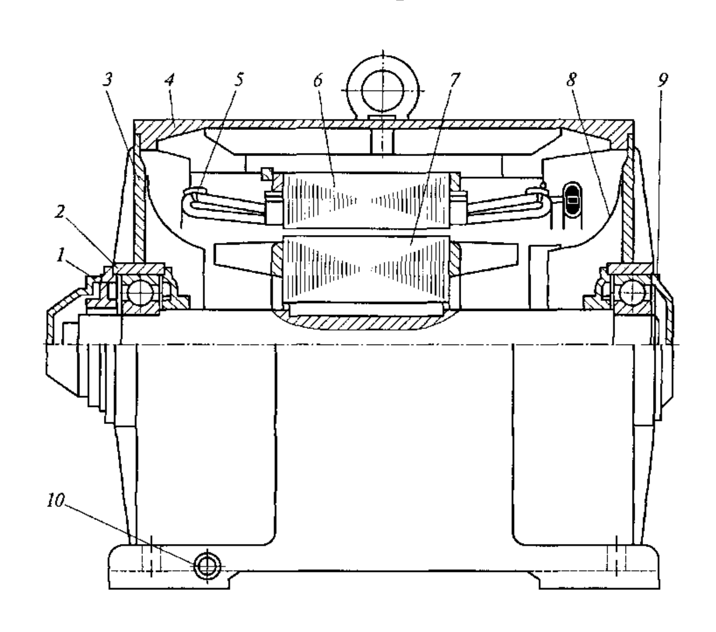



Рис. 14.7. Расщепитель фаз НБ-455А.
1, 9 – крышки подшипников; 2 – подшипник; 3 – подшипниковый щит; 4 – статор; 5 – бандажное кольцо; 6 – сердечник статора; 7 – ротор; 8 – направляющая воронка; 10 – болт заземления.

Статор РФ отлит из серого чугуна СЧ 12-28. По конструкции он аналогичен статору электродвигателей серий АП и АС. Подшипниковые щиты стальные, сварные. Сердечник статора набран из листов электротехнической стали 1213 толщиной 0,5 мм, покрытых с обеих сторон лаком и спрессованных с усилием 120...210 кН. Пазы статора полузакрытого типа и для улучшения пусковых свойств имеют скос на одно зубцовое деление.

Обмотка статора – двухслойная, трехфазная, несимметричная, состоит из мягких катушек, имеющих несколько вариантов исполнения. Катушечные группы соединены скруткой и прикреплены к выводным проводам хомутиками из мягкой листовой меди толщиной 1,5 мм. Предварительно соединения обматывают тонкой медной проволокой и припаивают припоем ПОС-40. После этого их изолируют двумя слоями стеклолакоткани ЛСЭ-19 толщиной 0,2 мм и одним слоем вполнахлеста тафтяной ленты толщиной 0,25 мм. Выводы обмотки статора присоединены к зажимам клеммной коробки типа КЗ. Обмотка в пазах закреплена клиньями высотой 7 мм и дважды пропитана лаком МГМ8. Каждая катушка подвязана к изолированному бандажному кольцу. Статор с обмотками дважды пропитывается лаком МГМ8. Сердечник ротора набран из нелакированных листов электротехнической стали 1211. Его короткозамкнутая обмотка залита алюминием А1. Подшипниковые щиты и крышки отлиты из серого чугуна СЧ 12-28. В нижней части щитов имеются люки, через которые поступает воздух. В качестве подшипников качения использованы шариковые подшипники типа 317. Расщепитель фаз в холодном состоянии допускает протекание тока короткого замыкания при неподвижном роторе не более 20 с при напряжении 260 В и 6 с при напряжении 460 В. Повторное включение при токе короткого замыкания недопустимо и в крайнем случае может быть произведено не ранее, чем через 10 мин. Для уменьшения размеров РФ, повышения коэффициента мощности системы и некоторого регулирования симметрии напряжения при изменении нагрузки к зажимам наиболее крупных двигателей привода вспомогательных агрегатов подключают конденсаторы. Компенсирующая емкость, приходящаяся на один расщепитель фаз, составляет приблизительно 2200 мкФ, а мощность – 170 кВА.

## 14.6. Сельсины.

Сельсин – это индукционный датчик, выполненный в виде миниатюрной трехфазной или однофазной электрической машины переменного тока, способной самосинхронизироваться.

Сельсины имеют две обмотки: возбуждения (ОВ) и синхронизации (С1-С2-С3). Обмотку возбуждения сельсина подключают к напряжению несущей частоты (рис. 14.8). Трехфазная обмотка синхронизации соединена в звезду. Индуцируемые в этой обмотке ЭДС и токи имеют одну и ту же временную фазу. Обмотка возбуждения может быть сосредоточенной или распределенной, а обмотка синхронизации всегда распределенная.

Принцип действия сельсина основан на изменении коэффициента взаимоиндукции *M* между подвижной и неподвижной обмотками при изменении их относительного положения. В ней создается пульсирующий магнитный поток возбуждения. Существует индикаторный и трансформаторный режим работы. В индикаторном режиме используются два идентичных сельсина. Обмотки возбуждения, расположенные на роторе, подключены к источнику несущей частоты, а обмотки статора соединены между собой. Обмотки возбуждения ОВ1 и ОВ2 наводят в обмотках статора ЭДС. Из-за разности наведенных ЭДС возникает уравнительный ток между статорными обмотками, который вызывает появление вращающего момента. Роторы сельсинов поворачиваются до положения, при котором уравнительный ток статорных обмоток будет равен нулю. В случае принудительного поворота ротора сельсина-датчика на угол α нарушается равновесие ЭДС статорных обмоток, и ротор сельсина-приемника поворачивается на такой же угол α.

В автоматике сельсины наиболее широко применяют в качестве измерительных устройства систем автоматического регулирования (САР) для определения угловых перемещений и угловых рассогласований между входной и выходной величинами. Измерительные схемы на сельсинах, выполненные по типу «угол рассогласования–фаза– код», обладают высокой

точностью и удобны для соединения с компьютером. По конструктивному исполнению сельсины подразделяют на контактные и бесконтактные. Принцип действия бесконтактного сельсина основан на пространственном вращении вектора пульсирующего магнитного потока $\Phi_d$ при соответствующем угле поворота ротора.

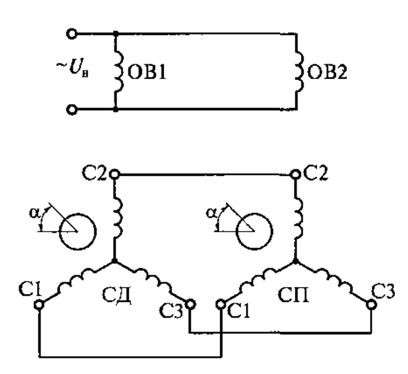



Рис. 14.8. Схема соединения сельсинов в индикаторном режиме.
СД - сельсин-датчик; СП - сельсин.

Бесконтактный сельсин (как и контактный) является обратимой электрической микромашиной. В трансформаторном режиме, когда ротор сельсина-приемника фиксирован, этот поток индуцирует в однофазной обмотке сельсина-приемника синусоидальную ЭДС E, изменяющуюся в зависимости от углового рассогласования, а между роторами сельсина-датчика и сельсина-приемника. Указатель позиций контроллера машиниста электровоза построен на базе индикаторного режима работы сельсинов и предназначен для указания положения (позиции) главного контроллера. Сельсин БД-1404 предназначен для выдачи сигнала блоку управления при реостатном торможении.

## 14.7. Тахогенераторы.

Тахогенераторами называются электрические машины, служащие для преобразования механической частоты вращения вала в электрический сигнал – выходное напряжение. По роду тока тахогенераторы подразделяются на тахогенераторы постоянного и переменного тока. К тахогенераторам предъявляются следующие основные требования:
• линейность и большая крутизна выходной характеристики;
• малая амплитудная погрешность;
• малая фазовая погрешность (для тахогенераторов переменного тока);
• минимальная пульсация выходного напряжения (для тахогенераторов постоянного тока);
• малый момент инерции ротора и малая электромагнитная постоянная времени;
• стабильность выходной характеристики;
• малые масса и габариты.

На локомотивах тахогенераторы применяются для измерения частоты вращения валов, а также для осуществления обратной связи по частоте вращения и для введения сигнала по производной от угла поворота в системах автоматического регулирования.

**Тахогенераторы постоянного тока.** Это генераторы постоянного тока небольшой мощности с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением. В режиме холостого хода при постоянном магнитном потоке возбуждения Ф выходное напряжение тахогенератора равно ЭДС. Статическая характеристика идеального тахогенератора

$$E = c_e \Phi n \quad (14.1)$$

где $c_e$ – постоянный коэффициент; Ф – магнитный поток, Вб; $n$ – частота вращения ротора, об/мин. Из уравнения (14.1) видно, что выходное напряжение тахогенератора при Ф = const изменяется пропорционально изменению частоты вращения n. Наклон статической характеристики зависит от сопротивления нагрузки. Уравнение (14.1) получено без учета

влияния реакции якоря и постоянной величины падения напряжения на переходе щетки–коллектор. В тахогенераторах с электромагнитным возбуждением изменение температуры окружающей среды приводит к изменению сопротивления обмотки возбуждения и, следовательно, тока возбуждения, что приводит к увеличению погрешности измерения. Для уменьшения температурной погрешности магнитную систему тахогенератора делают насыщенной. В этом случае изменение тока возбуждения почти не влияет на значение магнитного потока тахогенератора. Основные преимущества тахогенератора постоянного тока заключаются в высокой чувствительности и отсутствии фазовых погрешностей. К недостаткам следует отнести наличие щеток и коллектора, которые снижают надежность тахогенератора.

**Синхронный тахогенератор.** Конструкция синхронного тахогенератора не отличается от конструкции синхронного генератора малой мощности. На статоре расположена трехфазная обмотка, соединенная звездой. Ротор выполнен в виде постоянных магнитов с одной или двумя парами полюсов. ЭДС тахогенератора в режиме холостого хода определяется выражением: $E_{вых} = 4{,}44\, wf\Phi$, (14.2)

где $w$ – число витков обмотки статора; $f$ – частота выходного напряжения, Гц; Ф – магнитный поток возбуждения, Вб. При Ф = const $E_{вых}$ тахогенератора прямо пропорциональна частоте вращения ротора. Величина ЭДС не зависит от внешних условий, а зависит только от частоты вращения ротора, поэтому точность измерений определяется только точностью измерения величины выходного напряжения. Недостатком тахогенераторов переменного тока является нестабильная работа при малой частоте вращения ротора и его нереверсивность.

Контрольные вопросы

1. По какой причине в качестве возбудителя применяют однофазный синхронный генератор?
2. В чем состоит особенность питания трехфазных двигателей от расщепителя фаз?
3. Почему тахогенераторы постоянного тока имеют низкую точность показаний?

# Глава 15.
# ТРАНСФОРМАТОРЫ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ.
## 15.1. Трансформаторы электроподвижного состава.

В настоящее время на электровозах переменного тока применяют тяговые трансформаторы с масляным охлаждением. Технические характеристики тяговых трансформаторов приведены в табл. 15.1. Силовой трансформатор является основной частью энергетической цепи электровоза со статическими преобразователями. Принципиальное отличие тягового трансформатора от трансформатора общепромышленного исполнения заключается в совмещении ряда функций, важнейшая из которых – изменение в широком диапазоне напряжения на нагрузке (электродвигателях). Кроме того, на вторичной стороне трансформатора располагаются обмотки, питающие постоянным стандартным напряжением вспомогательную нагрузку и других потребителей в зависимости от применяемых систем управления тяговыми электродвигателями. Конструкция тяговых трансформаторов в значительной степени зависит от принятого способа регулирования напряжения на электровозе. Напряжение на выходе трансформатора регулируют изменением числа включенных витков первичной и вторичной обмоток. В практике отечественного электровозостроения наиболее широкое распространение получило регулирование путем переключения числа витков вторичной обмотки, или низковольтное регулирование (регулирование на низшей стороне трансформатора). Существуют два способа такого регулирования: согласованное и встречно-согласованное, из них наиболее широко применяется второй. При низковольтном регулировании обмотка низкого напряжения разделяется на две части: нерегулируемую (основная обмотка) и регулируемую (регулировочная обмотка). Первой на сердечнике располагают обмотку низкого напряжения (первая и вторая ветвь), затем обмотку высокого напряжения *A–X* и снаружи

регулировочную обмотку низкого напряжения *A–O–X* (рис. 15.1). Обмотка собственных нужд состоит из нескольких катушек, на данном рисунке их две: $A_1 - X_1$ и $A_2$–$X_2$. Они размещаются во внешнем блоке катушек каждого стержня между группами катушек низкого напряжения. Регулировочная обмотка разделена на несколько ступеней, число витков которых равно между собой. Наибольшее напряжение на обмотке низкого напряжения (выводы 1 – $O_1$, $O_2$–5) получается при согласном включении основной и всей регулировочной обмотки (соединение *X– O*). По мере выключения секций регулировочной обмотки напряжение снижается, и при ее полном выключении остается только напряжение на зажимах *X– O* обмотки. Дальнейшего уменьшения напряжения достигают встречным включением основной обмотки и ступеней регулировочной обмотки. Обычно число витков основной обмотки несколько больше, чем регулировочной обмотки. Так, при встречном включении напряжение небольшое (40...70 В) и соответствует первой ступени регулирования.

*Таблица 15.1. Технические характеристики тяговых трансформаторов*

| Параметр | Тип трансформатора | | |
|---|---|---|---|
| | ОЦР-5600/25 | ОДЦЭ-5000/25 | ОДЦЭ-4000/25 |
| Типовая мощность, кВА | 5600 | 5000 | 4000 |
| Номинальная мощность обмоток, кВ-А: | | | |
| сетевой | 5244 | 4485 | 3680 |
| тяговой | 4942 | 4220 | 3620 |
| собственных нужд | 300 | 225 | 80 |
| отопления | 800 | - | - |
| Напряжение холостого хода обмоток, В: | | | |
| сетевой | 25000 | 25000 | 25000 |
| собственных нужд | 399 | 638/406/232 | 332/240 |
| отопления | 3027 | - | - |
| Номинальный ток обмоток, А: | | | |
| сетевой | 210 | 180 | 147 |
| тяговой | 2400 | 2×1750 | 950 |
| собственных нужд | 750 | 550 | 340 |
| отопления | 264 | - | - |
| Потери холостого хода, кВ-А | 6,1 | 5,8 | 5,2 |
| Масса трансформатора, кг. | 11300 | 8000 | 5800 |

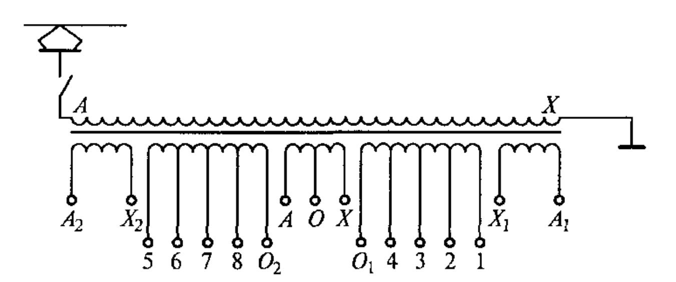



Рис. 15.1. Схема тягового трансформатора ОЦР-5000/25.

Высоковольтное регулирование (регулирование на высшей стороне трансформатора) осуществляется либо с помощью одного трансформатора (рис. 15.2, *а*), либо двух – автотрансформатора *T*1 и трансформатора *T*2 с постоянным коэффициентом трансформации (рис. 15.2, *б*). Они совмещены в одной магнитной системе в виде трехстержневого трансформатора. Сечение среднего стержня такого трансформатора равно сечению двух крайних стержней. На одном из крайних стержней размещена обмотка автотрансформатора, подключенная к контактной сети. Эта обмотка разделена на ряд ступеней обычно с одинаковым числом витков, выводы от которых присоединены к высоковольтному

переключателю. На этом же стержне размещена обмотка собственных нужд. При регулировании напряжения величина тока в секциях обмотки автотрансформатора неодинакова и зависит от положения переключателя. По этой причине обмотку автотрансформатора можно выполнять из провода различного сечения, применяя для крайних секций провод большего сечения, а для средних – меньшего.

В отечественных тяговых трансформаторах применяют в основном двухстержневые сердечники с цилиндрическими обмотками на обоих стержнях, расположенными концентрически. Обмотки могут быть соединены последовательно или параллельно. При сердечнике броневого типа обмотки располагают на среднем стержне, при этом сечение двух крайних стержней, охватывающих обмотку снаружи, равно половине сечения среднего стержня. В этом случае применяют в основном чередующиеся обмотки дискового типа, хотя могут быть использованы и цилиндрические обмотки, как в стержневом трансформаторе. Отечественными заводами были изготовлены опытные электровозы ВЛ80В, на которых установлены трехстержневые трансформаторы ОЦРН-7300/25 с высоковольтным регулированием напряжения. Для уменьшения размеров трансформатора и расстояния между осями стержней обмотка автотрансформатора имеет эллиптическую форму, а остальные – цилиндрическую.

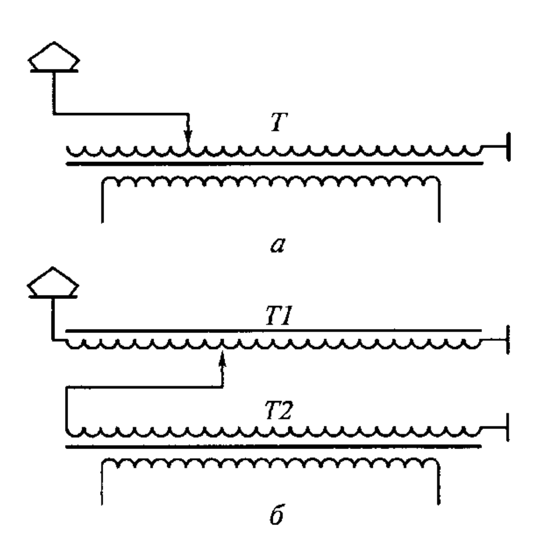



Рис. 15.2. Схема высоковольтного регулирования напряжения.
*а* – с помощью одного трансформатора *T*;
*б* – с помощью автотрансформатора *T*1 и трансформатора *T*2.

## 15.2. Конструкция тяговых трансформаторов

В отечественном электровозостроении применяются трансформаторы со стержневыми магнитопроводами. Вертикальные стержни служат для размещения обмоток. Стержни и ярма образуют замкнутую магнитную цепь. Магнитопроводы трансформаторов ОЦР-5600/25 и -5000/25 электровозов ВЛ60 с регулированием по низкому напряжению набраны из лакированных листов электротехнической холоднокатаной стали 3411 толщиной 0,5 мм. Вертикальные стержни выполнены из листов разной ширины, а ярма – из листов одинаковой ширины. Активное поперечное сечение стержня равно 629 см$^2$, ярма– 661 см$^2$. Пакеты листов каждого стержня магнитопровода стянуты пятью шпильками Ml2, изолированными от стали бумажно-бакелитовыми трубками и шайбами. Вертикальные стержни магнитопровода трансформатора ОЦР-5000/25 на 130 мм. короче стержней магнитопровода трансформатора ОЦР-5600/25. Вертикальные стержни в трехстержневом магнитопроводе трансформатора ОЦРН-7300/25 (рис. 15.3) выполнены из листов разной ширины, поэтому их поперечные сечения отличаются по форме. Свободный стержень имеет Т-образное сечение. Листы магнитопровода изготовлены из электротехнической стали 3411 толщиной 0,5 мм и покрыты

лаком. *Первичная обмотка A–X* рассчитана на напряжение 27,5 кВ и выполнена в виде трех групп катушек, соединенных последовательно. Все катушки намотаны проводом ПБОО сечением 10×3,53 мм и имеют по $10^{15}/_{16}$ – витка. Первичная обмотка распределена поровну на обоих стержнях магнитопровода между нерегулируемыми и регулируемыми частями вторичной обмотки. Такое расположение способствует снижению магнитных потоков рассеяния и индуктивного сопротивления трансформатора.

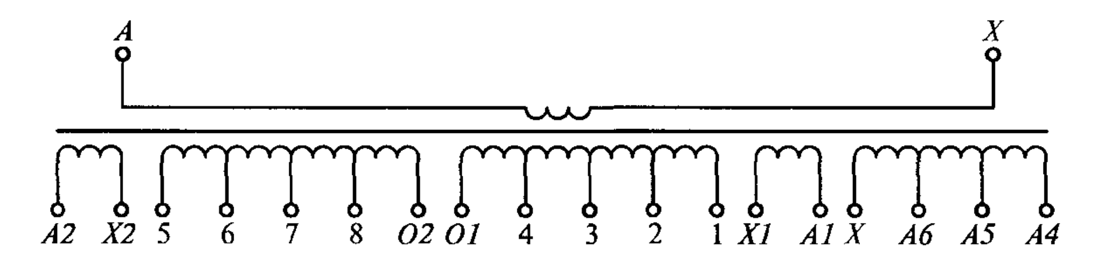



Рис. 15.3. Схема тягового трансформатора ОЦРН-7300/25.

*Вторичная обмотка* состоит из нерегулируемой (основной) части, регулируемой части и обмотки собственных нужд, намотана проводом ПБОО сечением 8,6×2,83 мм. Катушки – дискового типа, имеют в слоях по одному витку. Между дисками катушек установлены изоляционные прокладки из электрокартона. Расстояние между катушками равно 5 мм. Для трех верхних и трех нижних катушек это расстояние увеличено до 7,5 мм. Нерегулируемая часть обмотки состоит из двух катушек (плеч) *A*1–*X*1 и *A*2–*X*2, которые по двухходовой спирали совмещены одна с другой. Каждое плечо имеет по 50 витков. В витке катушки имеется по десять параллельных проводов ПБОО сечением 13,5х3,53 мм. Нерегулируемые обмотки расположены на обоих стержнях магнитопровода в непосредственной близости от их поверхности и соединены между собой последовательно, что упрощает их изоляцию от стали сердечника. Регулируемая часть обмотки также имеет два плеча О2–5 и О1–1, каждое из которых состоит из четырех дисковых катушек, соединенных последовательно. Секция плеча состоит из двух обмоток, включенных параллельно и расположенных на обоих стержнях магнитопровода. Плечи имеют по 48 витков. Регулируемая часть обмотки состоит из групп, каждая из которых имеет две последовательно соединенные дисковые катушки. Таких катушек на каждом стержне 28. Обмотки обоих стержней магнитопровода соединены параллельно. Каждая из катушек намотана из четырех параллельных проводов ПБОО сечением 8,6×2,44 мм в один слой, по 3,5 витка в слое. Каждая регулируемая часть имеет свою левую точку и четыре ступени. Для вторичной обмотки допускаются следующие режимы работы:

• при согласованном включении регулируемых и нерегулируемых частей, т. е. соединение ввода XI поочередно с отводами 1, 2, 3 и 4, а ввода *X*2 – поочередно с отводами 5, 6, 7 и 8;

• при встречном включении нерегулируемых частей с регулируемыми, т.е. соединение ввода XI поочередно с отводами 8, 7, 6 и 5, а ввода *X*2 – поочередно с отводами 4, 3, 2 и 1;

• при соединении нерегулируемых частей обмотки, т.е. соединение *X*1 – *O*1 и *O*2 – *X*2.

Обмотка собственных нужд *X*–*A*4 выполнена из четырех двойных дисковых катушек, размещенных поровну на каждом стержне в третьем наружном блоке примерно по середине стержней. Обмотки обоих стержней соединены параллельно. Каждая катушка имеет по 15 витков, намотанных проводом ПБОО сечением 3,05х11,6 мм, т.е. всего 60 витков. Для получения ступеней напряжений 625, 479, 196 и 228 В в катушках 26 и 36 на четвертом витке, считая от внутреннего перехода, имеются отводы.

Провода, расположенные вне обмоток и служащие для соединения отдельных частей обмоток и концов обмоток с вводами и регулировочных ответвлений с переключающим устройством, называют отводами. В комплект отводов входят медные шины без изоляции или изолированные проводники и набор деревянных планок для их закрепления. Схема отводов зависит от устройства обмоток, их группировки и схемы соединения. Так, в

трансформаторе ОЦР-5600/25 отводы от вторичных обмоток выполнены из медных шин без изоляции и укреплены деревянными планками, а отводы от первичной обмотки – из изолированного провода.

В масляных трансформаторах, применяемых на электровозах, обмотки соединяют с силовой схемой вводами, расположенными в крышке трансформатора. Ввод состоит из токоведущей части, выполненной из медного стержня, и изоляции. Конструкция ввода прежде всего зависит от класса изоляции обмотки, соединенной с ним. Ввод должен обладать необходимыми тепловыми характеристиками, электрической и механической прочностью.

Масляные тяговые трансформаторы помещают в бак, который представляет собой стальной резервуар. При работе трансформатора осуществляется непрерывная конвекционная циркуляция масла. Масло, нагретое от магнитопровода и обмоток, через стенки бака отдает теплоту в окружающую среду и охлаждается. Поэтому при разработке конструкции бака выполняют тепловой расчет. Бак имеет достаточный запас прочности и выдерживает избыточное внутреннее давление 5,0 МПа. Расширитель входит в комплект бака и служит для защиты масла от попадания влаги, которая может привести к снижению электрической прочности бака и преждевременному старению изоляции. В трансформаторе без расширителя уровень масла в баке находится ниже крышки, поэтому при изменении температуры масла его уровень либо поднимается, либо опускается, в результате чего часть воздуха вытесняется наружу или засасывается из окружающей атмосферы, что снижает эффективность теплообмена.

Расширитель при всех режимах работы трансформатора и при любой возможной температуре окружающей среды обеспечивает полное заполнение бака маслом. Температура масла в расширителе значительно ниже, чем в верхней части бака, что замедляет процесс окисления масла. Кроме того, в расширителе практически отсутствует конвекционная циркуляция масла. Поэтому влага, попавшая в масло из воздуха, осаждается в отстойнике и в бак не проникает.

Система охлаждения трансформаторов включает в себя масляные насосы с электродвигателями и трубопроводами, масляные радиаторы, воздухопроводы, агрегат мотор-вентилятора и термосигнализирующие приборы. Масло поступает в систему из верхней части бака трансформатора и насосом подается по маслопроводу в радиаторы. Из радиаторов охлажденное масло поступает в нижнюю часть бака, проходит по каналам обмоток и в нагретом состоянии достигает верхней части бака, откуда снова возвращается в систему охлаждения.

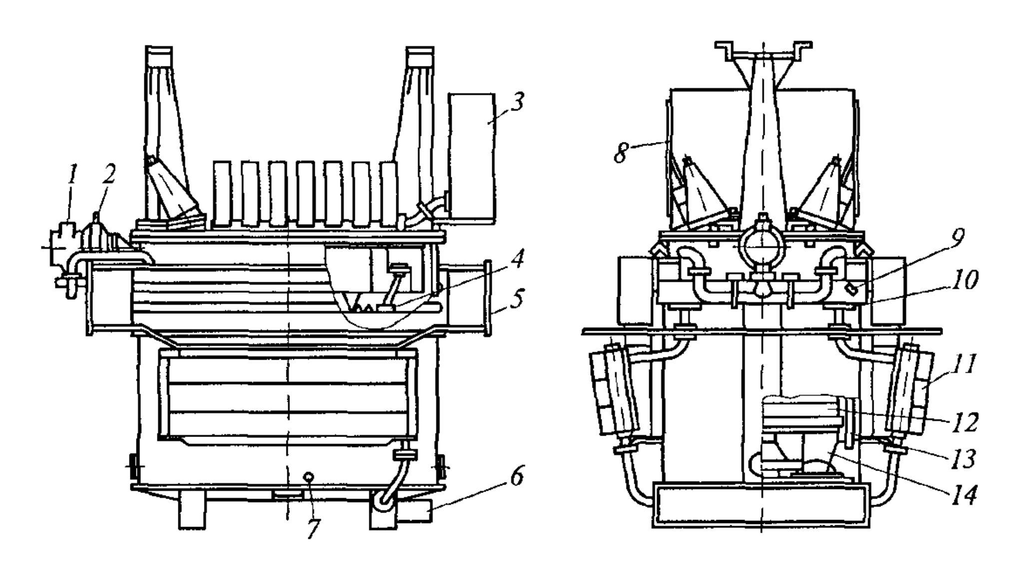



Рис. 15.4. Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б.
1 – электронасос; 2 – пробка; 3 – расширитель; 4 – прижим; 5 – балка-камера; 6 – вентиль; 7 – кран; 8 – указатель уровня; 9 – бобышка; 10 – стакан; 11 – охладитель; 12 – сердечник; 13 – обмотка; 14 – опора.

В трансформаторах ОЦР-5000/25 и -5600/25 для охлаждения масла применяют по одному моноблочному электронасосу ЭЦТ63/10, который устанавливается между баком и радиаторами. Для лучшего рассеивания теплоты радиаторы принудительно обдуваются воздухом, поступающим по воздухопроводам от вентиляторов: на электровозе ВЛ80 – от осевого вентилятора СВМ-6М, на электровозе ВЛ60 – от центробежных вентиляторов Ц13-50 или Ц8-19. Расход воздуха, проходящего через радиаторы, составляет около 20000 $м^3$/ч, а падение напора в системе охлаждения трансформатора – примерно 700 Па (70 мм вод. ст.). Трансформатор ОЦР-5600/25 имеет систему охлаждения, подобную рассмотренной. Принудительная циркуляция масла в трансформаторах ОЦР-5600/25, установленных на электровозах ВЛ60 до № 754, осуществляется двумя центробежными насосами 2К-9 с приводом от трехфазных двигателей АОМ42-2. Насосы помещены в расширители, наполненные маслом, и имеют подачу 22 $м^3$/мин при напоре 175 Па (17,5 мм вод. ст.). Расход воздуха на охлаждение радиаторов не превышает 19 500 $м^3$/ч. На маслопроводе, идущем от насоса к радиаторам, установлено струйное реле СРЭ-2. При отсутствии циркуляции масла реле размыкает цепь управления, прекращая работу электровоза. Температура масла контролируется термометрическим сигнализатором.

Трансформатор ОЦРН-7300/25 имеет систему охлаждения с одним контуром. Циркуляция масла из бака в радиатор осуществляется насосом 2К-9 с приводом от электродвигателя АОМ42-2. Подача насоса – 22 $м^3$/мин при напоре 175 Па (17,5 мм вод. ст.). Полный расход воздуха составляет 20 500 $м^3$/ч.

Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б (рис. 15.4) используется на электровозах ВЛ80 и предназначен для преобразования напряжения контактной сети в напряжение цепей тяговых двигателей, включенных через полупроводниковые преобразователи, и цепей собственных нужд электровоза.

### 15.3. Сглаживающие реакторы.

Сглаживающие реакторы предназначены для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения и представляют собой индуктивности, включаемые последовательно в цепь тяговых двигателей или их обмоток возбуждения. Обычно принимают, что при номинальном режиме коэффициент пульсации тока $k_q$ < 0,2...0,25. Однако величина $k_q$ непостоянна и возрастает при снижении нагрузки тяговых двигателей. Желательно, чтобы это увеличение коэффициента пульсации тока не превышало 0,3 во всем рабочем диапазоне тяговых двигателей. Для этого сглаживающий реактор должен обеспечивать соответствующее изменение индуктивности в цепи двигателей при изменении их нагрузки. Этим требованиям наиболее отвечают сглаживающие реакторы со стальными сердечниками, параметры которых приведены в табл. 15.2. На электровозах переменного тока применяют сглаживающие реакторы, как с замкнутой, так и с разомкнутой магнитными системами. *Реакторы с замкнутой магнитной системой* имеют большую массу, приходящуюся на единицу мощности, по сравнению с реакторами, имеющими разомкнутую магнитную систему. Преимуществом реакторов с замкнутой магнитной системой является то, что их магнитное поле слабо влияет на расположенное рядом оборудование, поэтому принимать специальных мер для ограничения этого влияния не требуется.

Реактор РЭД-4000А (рис. 15.5) предназначен для установки в кузове электровоза. Он состоит из двух основных узлов: магнитопровода 1 и обмотки 4. Магнитопровод набран из листов электротехнической стали, покрытых лаком. В осевом направлении магнитопровод стянут четырьмя шпильками 2, изолированными бумажно-бакелитовыми трубками, и гайками с гетинаксовыми шайбами. Стержни магнитопровода имеют по пять зазоров общей величиной 85 мм, заполненных гетинаксовыми прокладками. Верхний зазор равен 5 мм, остальные – 20 мм. Обмотка 4, установленная на стержнях, имеет двенадцать последовательно соединенных дисковых катушек, намотанных медной шиной сечением 5×50 мм с зазорами между витками

6 мм. Каждая катушка содержит по 12 витков. Катушки дважды пропитаны лаком ПЭ 933. В радиальном направлении катушки стянуты шестью бандажами из стеклоленты. Между дисками в осевом направлении имеются зазоры, равные 12 мм. Обмотка изолирована от стержней бумажно-бакелитовыми цилиндрами и в осевом направлении стянута болтами М12 через изоляторы 3. Электрическая прочность изоляции относительно земли испытывается напряжением 15 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин.

*Таблица 15.2. Параметры сглаживающих реакторов*

| Наименование | Тип реактора | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | РЭД-4000 | РЭД-4000А | РЭДР-1500 | РСМ-1 | РС-53 |
| Серия и номер электровоза | ВЛ60 (по №1434) | ВЛ60 (с № 1435) | ВЛ80В (№001-003) | ВЛ80 (по № 006) | ВЛ80 (с № 007) |
| Масса реактора, кг. | 1835 | 1575 | 570 | 960 | 810 |
| Часовой ток, А | 1545 | 1545 | 915 | 1850 | 1850 |
| Индуктивность, мГ:<br>при часовом токе<br>начальная | <br>5,5<br>9,5 | <br>5,6<br>10,5 | <br>6<br>10,4 | <br>3,2<br>5,25 | <br>6<br>4 |
| Площадь сердечника, см$^2$ (сталь 1312) | 430 | 430 | 540 | 800 | 800 |
| Масса сердечника, кг. | 1 180 | 995 | 283,4 | 560 | 810 |
| Размеры проводника, мм | 4,4×10,8 | 5×50 | 4,4×10,0 | 3×50 | 4×65 |
| Число витков | 140 | 144 | 112 | 68×2 | 112 |
| Материал обмотки | Провод ПСД | Медная шина | Провод ПСД | Медная лента | Медная шина |
| Масса обмотки, кг | 634 | 498 | 264 | 290 | 280 |

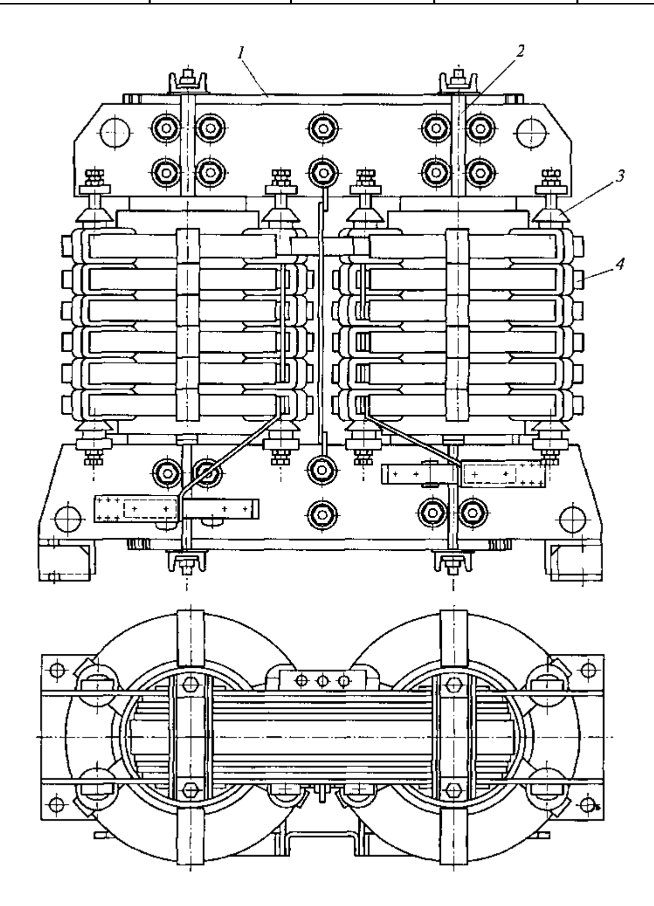



Рис. 15.5. Реактор РЭД-4000А.
1 – магнитопровод; 2 – шпилька М24; 3 – изолятор; 4 – обмотка.

Охлаждение реактора – воздушное, принудительное. К реакторам с разомкнутой магнитной системой относятся реакторы РЭДР-1500 и РСМ-1, основные параметры которых приведены в табл. 15.2. Магнитопровод реактора представляет собой стержень, шихтованный из листов стали Э42 толщиной 0,5 мм, покрытых лаком. Листы скреплены в сердечнике тремя шпилькам Ml2, изолированными бумажно-бакелитовыми трубками и прокладками, установленными под гайками. Этими же шпильками к сердечнику прикреплены две пластины толщиной 10 мм, на которых реактор монтируется в горизонтальном положении на четырех стойках.

Обмотка представляет собой цилиндрическую четырехслойную катушку, намотанную на узкое ребро из двух параллельных проводов ПСД. Она размещена на изоляционном стеклобакелитовом цилиндре и стеклотекстолитовых клиньях. Между слоями обмотки предусмотрены осевые вентиляционные каналы. С торцов обмотка заканчивается кольцами из стеклобакелитовых цилиндров, скрепленными с крайними витками бандажами из стеклоленты шириной 100 мм. Снаружи обмотка скреплена двумя слоями стеклоленты. Заземленные части обмотки испытывают напряжением 9 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин.

Реактор РС-53 представляет собой значительное индуктивное сопротивление и предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи тяговых двигателей. Реактор состоит из обмотки с магнитопроводом, двух гетинаксовых боковин-изоляторов, двух кожухов, улучшающих охлаждение реактора, стяжных шпилек и установочных уголков. Обмотка изготовлена из медной шины сечением 4×65 мм., намотанной на ребро с зазором между витками 4 мм; витковая изоляция, выполненная из электронита, устанавливается на $^1/_3$ высоты обмотки для улучшения охлаждения последней. Магнитопровод – радиально-шихтованный из лакированных листов электротехнической стали 2212 толщиной 0,5 мм. Цилиндрическая поверхность магнитопровода покрыта стеклопластом.

## **15.4. Переходные реакторы**.

Переходные реакторы служат для ограничения тока в контуре секций вторичной обмотки трансформатора при их закорачивании переключателем обмоток в процессе регулирования напряжения на вторичной стороне трансформатора. При подключении реактора к обмотке трансформатора в его цепи возникает переходный ток, зависящий от напряжения секции трансформатора $\Delta I$ и сопротивления цепи. При установке переходного реактора со стальным сердечником амплитуда суммарного тока на фиксированной пусковой позиции может достигать 18...20 кА, что приводит к свариванию контактов переключателя. Возникновение таких скачков тока объясняется насыщением магнитной системы реактора нагрузочным током на нефиксированных позициях пуска. Чтобы переключатель и реактор работали надежно, максимальное значение амплитуды суммарного тока не должно превышать 600 А. На отечественных электровозах для этого применяют переходные реакторы без стальных сердечников, с линейной магнитной характеристикой. Переходные реакторы без стального сердечника имеют меньшую массу. Однако магнитное поле таких реакторов вызывает нагрев расположенного рядом оборудования и элементов конструкции кузова, поэтому необходимо принимать меры для предотвращения его влияния. На электровозах переменного тока применяют переходные реакторы, как со стальными сердечниками, так и без них (табл. 15.3).

К переходным реакторам без стального сердечника относится реактор ПРА-1М (рис. 15.6), представляющий собой комплект из двух самостоятельных реакторов – верхнего и нижнего. Каждый из реакторов имеет по четыре катушки и включен в одно из плеч трансформатора. Каждая катушка реактора намотана на ребро в один слой из двух параллельных алюминиевых шин и имеет 11 витков. Между параллельными шинами предусмотрены зазоры, равные 3 мм, а между витками – 7 мм. Катушка в радиальном направлении скреплена восемью бандажами из стеклолент, а в осевом – шпильками из дюралюминия. Катушки соединены между собой последовательно с транспозиционными переходами на внутренних выводах и находятся одна от другой на расстоянии 24 мм.

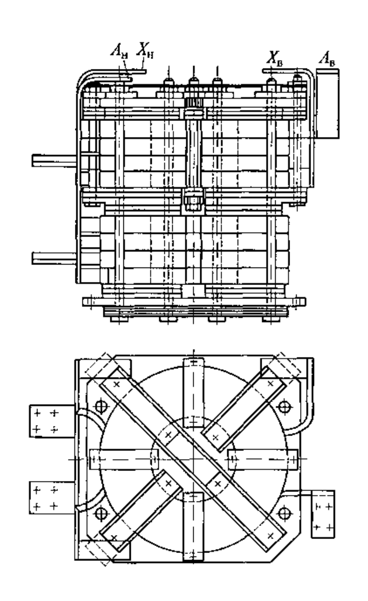



Рис. 15.6. Переходный реактор ПРА-1М.
$A_в$, $A_н$ – начала обмоток, $X_в$, $X_н$ – концы обмоток

*Таблица 15.3. Параметры переходных реакторов.*

| Параметр | Тип реактора | | |
|---|---|---|---|
| | ПРА-1М | ПРА-3 | ПРА-48 |
| Серия и номер электровоза | ВЛ60 | ВЛ80 с № 004 | ВЛ80 |
| Часовой ток ветви, А | 1080 | 1350 | 1270 |
| Индуктивное сопротивление, Ом | 0,26 | 0,12 | 0,12 |
| Магнитопровод:<br>марка стали<br>материал обмотки | –<br>Алюминиевая шина А (сечение 6×60 мм) | 1312<br>Алюминиевая шина А (сечение 8×60 мм) | 2212<br>Алюминиевая шина А (сечение 8×60 мм) |
| количество витков | 44 | 32 | 32 |
| Масса реактора, кг. | 580 | 570 | 450 |

Для упрочнения бандажей и предохранения алюминиевых шин от коррозии и загрязнения катушки дважды пропитывают лаком. Для предохранения стальных деталей, находящихся вблизи реактора, от чрезмерного нагрева предусмотрено экранирование магнитных полей рассеяния шихтованными пакетами, выполняющими роль магнитного шунта. Верхние пакеты (8 шт.) крепят к реактору специальными шпильками, нижние пакеты (16 шт.) – к гетинаксовому основанию толщиной 30 мм, на котором закреплены и реакторы. Расстояние от поверхности основания до шины нижней катушки нижнего реактора равно 68 мм, а между смежными катушками обоих реакторов – 116 мм. Эти расстояния выдерживают с помощью гетинаксовых прокладок. Расстояния между реакторами, а также между реактором и крышкой трансформатора выбирают, исходя из условий теплоотдачи поверхностей токоведущих частей и пробивного напряжения изоляции.

Переходный реактор ПРА-48 (рис. 15.7) представляет собой комплект из двух реакторов (ветвей), каждый из которых работает самостоятельно в одном из плеч вторичной обмотки трансформатора. Каждая ветвь состоит из четырех спиральных катушек, намотанных двумя параллельными алюминиевыми шинами размером 8×60 мм с зазором между шинами 7 мм. Для уменьшения потоков рассеяния в торцовых частях каждого реактора расположены экранирующие пакеты, шихтованные из электротехнической стали 2212 толщиной 0,5 мм. Оба комплекта катушек ветви установлены на основании из гетинакса толщиной 30 мм и в

осевом направлении стянуты восемью шпильками из дюралюминиевого сплава. Для предотвращения попадания между витками посторонних предметов над верхним комплектом катушек укреплены листы из асбестоцементной доски толщиной 12 мм. При установке реактора на крышке трансформатора расстояние между крышкой и основанием реактора должно быть не менее 100 мм.

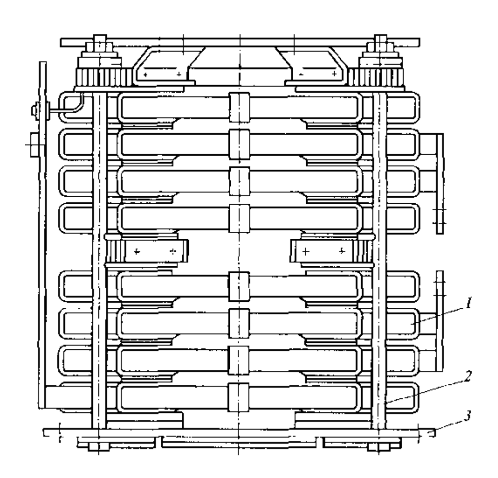



Рис. 15.7. Переходный реактор ПРА-48.
1 – катушка; 2 – шпилька; 3 – основание.

### 15.5. Трансформаторы и магнитные усилители.

Трансформаторы, применяемые на тепловозах, подразделяются по назначению на измерительные, распределительные и стабилизирующие. *Измерительные* трансформаторы служат для включения измерительных приборов в сети переменного тока. На рис. 15.8 показаны варианты схем включения измерительных трансформаторов напряжения и тока. Используемые вольтметры и амперметры должны быть подобраны с учетом максимальных значений измеряемых величин. Разрыв вторичной цепи трансформатора тока (холостой ход) не допускается во избежание существенного возрастания магнитного потока и тепловых потерь в стали сердечника. Вместе с потоком увеличивается вторичное напряжение, что представляет опасность для обслуживающего персонала. При измерениях вторичные цепи должны быть замкнуты.

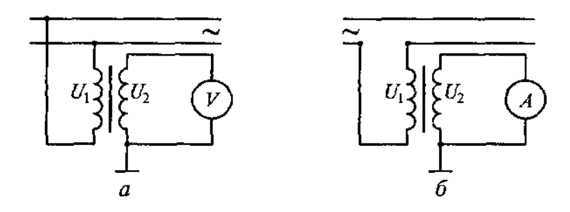



Рис. 15.8. Схема включения измерительных трансформаторов напряжения (*а*) и тока (*б*).

*Распределительные* трансформаторы предназначены для преобразования и распределения переменного напряжения питания различных цепей. На тепловозах 2ТЭ10Л для питания цепей управления установлены трансформаторы ТР-5, на тепловозах 2ТЭ116 - ТР-4 и -70 или ТР-21 и -26, на тепловозах 2ТЭ10М -ТР-23.

Трансформаторы ТР-4, -5, -70 представляют собой трансформаторы броневого типа и состоят из магнитопровода и катушек. Магнитопровод набран из листов электротехнической стали, стянутых шпильками и угольниками. Катушка – бескаркасная, имеет первичные и вторичные обмотки, залита компаундом на основе эпоксидной смолы и закрыта кожухом. Выводы обмоток расположены на двух пластмассовых панелях.

Трансформаторы ТР-21 (ТР-20, -23, -26) состоят из кольцевого сердечника, изготовленного

из электротехнической стали, и обмоток, расположенных на сердечнике. Концы обмоток припаяны к выводам, размещенным на изолированной панели. Сердечник обмотки и панель залиты компаундом на основе эпоксидной смолы. Технические данные распределительных трансформаторов приведены в табл. 15.4.

*Стабилизирующий* трансформатор ТС-2 улучшает динамические характеристики системы возбуждения тепловоза. Магнитопровод стабилизирующего трансформатора набран из П-образных пластин и полос электротехнической стали. На магнитопроводе расположена катушка с первичной и вторичной обмотками, выводы которых размещены на пластмассовых панелях. Конструкция трансформатора предусматривает возможность регулировки воздушного зазора между ярмом и сердечником при помощи немагнитных прокладок из прессшпана. Первичная обмотка подсоединена через резистор к выходу возбудителя, а вторичная – к стабилизирующей обмотке амплистата. При быстром нарастании напряжения возбудителя в амплистат подается отрицательный сигнал, и скорость нарастания напряжения уменьшается. При резком снижении напряжения возбудителя в амплистат подается положительный сигнал, и скорость снижения напряжения уменьшается. Параметры трансформатора ТС-2 представлены ниже:

| | Первичная обмотка | Вторичная обмотка |
|---|---|---|
| Маркировка зажимов | HI –K1 | H2 –K2 |
| Номинальное напряжение, В | 60 | 28 ± 3 |
| Число витков | 1900 | 1000 |

*Таблица 15.4. Технические данные распределительных трансформаторов.*

| Тип трансформатора | Вид обмотки | Маркировка зажимов | Номинальное напряжение | Номинальный ток, А |
|---|---|---|---|---|
| ТР-4 | Первичная | Н1-К1 | 270 В | 5,0 |
| | Вторичные | Н2-К2 | 35 В ±2,5% | 2,6 |
| | | Н3-К3 | 55В ± 2,5% | 1,5 |
| | | Н4-К4 | 75 В ± 2,5% | 3,1 |
| | | Н5-К5 | 55 В ± 2,5% | 1,5 |
| ТР-5 | Первичные | Н1-К1 | 100 В | 11,0 |
| | | Н1-01 | (60 ± 2,0) В | 8,5 |
| | | Н1-02 | (50 ± 2,0) В | 8,5 |
| | Вторичные | Н2-К2 | (50 ± 2,0) В | 2Д |
| | | Н3-К3 | (50 ± 2,0) В | 2,1 |
| | | Н4-К4 | (50 ± 2,0) В | 2,1 |
| | | Н5-К5 | (30 ± 2,0) В | 3,0 |
| ТР-21 | Первичная | 1-2 | 270 В | 4,0 |
| | Вторичные | 3-4 | 110 В ± 2,5% | 0,5 |
| | | 5-6 | 110 В ± 2,5% | 2,6 |
| | | 7-8 | 110 В ± 2,5% | 2,6 |
| | | 9-10 | 110 В ± 2,5% | 2,6 |
| | | 11-12 | 55 В ± 2,5% | 1,5 |
| ТР-26 | Первичная | 1-2 | 270 В | 2,5 |
| | Вторичные | 3-5 | 36 В ± 2,5% | 2,7 |
| | | 3-4 | 20 В ± 2,5% | 0,6 |
| | | 7-8 | 55 В ± 2,5% | 2,7 |
| | | 9-10 | 55 В ± 2,5% | 2,7 |
| | | 11-12 | 71 В ± 2,5% | 3,3 |
| ТР-70 | Первичные | Н1-К1 | 270 В | 5,0 |
| | | Н1-01 | 110 В ± 2,5% | 5,0 |
| | Вторичные | Н2-К2 | 110 В ± 2,5% | 2,6 |
| | | Н3-К3 | 110 В ± 2,5% | 2,6 |
| | | Н4-К4 | 110 В ±2,5% | 2,6 |
| | | Н5-К5 | 55 В ± 2,5% | 1,5 |

*Магнитным усилителем* называют электромагнитный аппарат, служащий для плавного регулирования переменного тока, поступающего к нагрузке, путем изменения индуктивного сопротивления $x_L$ катушки с ферромагнитным сердечником, включенной последовательно с нагрузкой. Магнитный усилитель позволяет регулировать большие токи, используя сравнительно слабые электрические сигналы. Магнитные усилители широко применяют на тепловозах для автоматического регулирования возбуждения тягового генератора и на электроподвижном составе для регулирования напряжения при заряде аккумуляторных батарей, в стабилизаторах напряжения и для других целей. Существуют простые магнитные усилители и усилители с обратной связью. В простом магнитном усилителе (рис. 15.9, *а*) используют два сердечника. На каждом сердечнике расположена рабочая обмотка $W_р$ по которой протекает переменный ток. Сердечники охвачены единой обмоткой управления $W_у$, питаемой постоянным током. Рабочие обмотки имеют одинаковое число витков и встречно-последовательное включение для того, чтобы переменные ЭДС, индуцированные в обмотке управления, были направлены навстречу друг другу и взаимно уничтожались. Входом магнитного усилителя является обмотка управления, на которую подается управляющий сигнал $U_у$ Выходом усилителя служат рабочие обмотки, к которым подключают нагрузку $R_н$. Магнитный усилитель обладает способностью усиливать электрические сигналы. Это объясняется тем, что мощность, потребляемая обмоткой управления и расходуемая на ее нагрев, во много раз меньше мощности, передаваемой нагрузке $R_н$. Поэтому, затрачивая малую мощность в обмотке управления, можно регулировать значительно большую мощность, поступающую к нагрузке $R_н$, так как передача мощности нагрузке производится не от цепи управления, а от источника питания переменного тока. Управляющий сигнал $U_у$ постоянного тока позволяет изменять значение этой мощности.

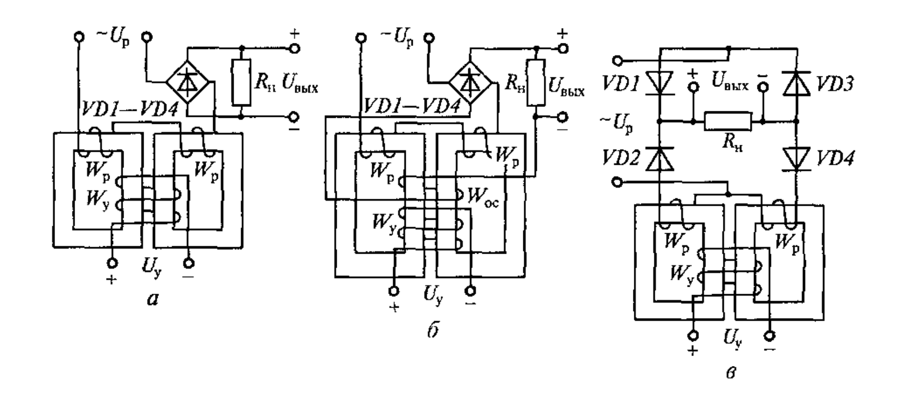



Рис. 15.9. Режимы работы магнитных усилителей.
*а* – простой; *б* – с внешней обратной связью; *в* – с внутренней обратной связью; VD1 – VD4 – выпрямители.

Магнитный усилитель работает следующим образом. Когда на вход усилителя не поступает управляющий сигнал (напряжение на входе усилителя $U_у$ и ток управления равны нулю), сердечники не насыщены и рабочие обмотки $W_р$, имеют большое индуктивное сопротивление. Ток в цепи нагрузки будет мал. Такой ток называют начальным, или током холостого хода усилителя. Напряжение на нагрузке $U_{вых}$ (выходное напряжение) будет также мало, так как большая часть напряжения питания $U_р$ теряется в виде падения напряжения в рабочих обмотках. Следовательно, будет мала и мощность, поступающая к нагрузке от источника питания. При подаче в обмотки управления $W_у$ тока управления сердечники подмагничиваются и индуктивное сопротивление $x_L$ рабочих обмоток уменьшается. При этом растут ток в цепи нагрузки и поступающая к ней мощность. Для магнитного усилителя справедливо равенство: $F_р = F_у$ (15.1)

где $F_р = I_р W_р$ – МДС рабочей обмотки, А; $F_у = I_у W_у$ – МДС обмотки управления, А; $W_р$, $W_у$ – число витков рабочей обмотки и обмотки управления; $I_р$, $I_у$– ток рабочей обмотки и обмотки управления. После подстановки в равенство (15.1) выражений для МДС получим выражение

для определения тока в цепи рабочих обмоток:

$$I_р = (W_у / W_р) \times I_у \quad (15.2)$$

Приведенное соотношение справедливо только до тех пор, пока ток $I_у$ не достигнет значения $I_{уmax}$, при котором сердечники магнитного усилителя будут насыщены в течение всего периода изменения питающего напряжения $U_р$. В случае насыщения сердечников, т.е. при $I_у = I_{уmax}$, индуктивное сопротивление рабочих обмоток станет равным нулю и магнитный усилитель потеряет свои управляющие свойства. Зависимость тока $I_р$ в цепи рабочих обмоток от тока управления $I_у$ при постоянном напряжении $U_р$ источника питания называется характеристикой управления магнитного усилителя. Характеристика управления для идеализированного магнитного усилителя симметрична относительно оси тока $I_р$, так как при изменении направления тока обмотки управления $I_у$ электромагнитные процессы в усилителе не изменяются.

*Коэффициент усиления по току* $k_1$ представляет собой отношение приращения тока в цепи нагрузки $I_р$ к приращению тока $I_у$ в цепи управления, а *коэффициент усиления* по мощности $k_р$ – отношение приращения мощности $P_н$, передаваемой нагрузке, к приращению мощности $P_у$, потребляемой обмоткой управления. Для того чтобы ток холостого хода был по возможности мал, а рабочие участки характеристики имели большие коэффициенты усиления по току $k_1$ и по мощности $k_р$, магнитную систему усилителя выполняют на тороидальных сердечниках из пермаллоя. Часто применяют сердечники, изготовленные их холоднокатаной стальной ленты. Усилители большой мощности изготовляют из листовой электротехнической стали с использованием П- или Ш-образных сердечников. Сердечники собирают весьма тщательно. Воздушные зазоры в стыках пластин должны быть по возможности минимальны. Наличие зазоров ухудшает свойства усилителя, так как его индуктивное сопротивление слабо зависит от тока управления, а коэффициенты усиления по току и по мощности уменьшаются. Современные магнитные усилители позволяют получать коэффициенты усиления $k_1 \leq 100$ и $k_р \leq 1\ 000$. Магнитные усилители обычно выполняют с обратными связями, которые обеспечивают увеличение стабильности работы усилителя и повышение его коэффициентов усиления.

*Обратной связью* в усилителе называется воздействие выходного тока или напряжения на его вход. Обратная связь может быть внешней и внутренней. Для создания внешней обратной связи в простых магнитных усилителях предусматривают специальную обмотку $W_{ос}$ (рис. 15.9, *б*), которая дополнительно подмагничивает или размагничивает сердечник. Она располагается на сердечнике так же, как и обмотки управления, и питается выпрямленным током, пропорциональным току нагрузки или напряжению на нагрузке. Обратная связь может быть положительной и отрицательной. Если при возрастании тока нагрузки обмотка обратной связи усиливает действие входного сигнала, то обратная связь называется положительной. Ее используют для повышения коэффициентов усиления. Если при возрастании тока или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи ослабляет действие входного сигнала, то связь называется отрицательной. Такую связь вводят в системы автоматического регулирования для повышения устойчивости их работы. Обычно обмотку обратной связи включают через выпрямители VD1– VD4, которые подсоединяют параллельно или последовательно нагрузке. При параллельном подсоединении ток в обмотке обратной связи будет пропорционален выходному напряжению $U_{вых}$ (обратная связь по напряжению), а при последовательном – току $I_р$ в цепи нагрузки (обратная связь по току). Если к нагрузке подводится выпрямленное напряжение, то можно использовать общий выпрямитель для питания нагрузки и создания обратной связи. Положительную обратную связь можно обеспечить и без специальной обмотки обратной связи. Для этого последовательно с каждой рабочей обмоткой $W_р$ включают полупроводниковые диоды VD1–VD4 (рис. 15.9, *в*). При таком включении по рабочей обмотке протекает выпрямленный пульсирующий ток (в первый полупериод по одной ее части, во второй полупериод – по другой), постоянная составляющая которого обеспечивает дополнительное подмагничивание сердечников. Следовательно, в этом усилителе рабочие обмотки являются одновременно и

подмагничивающими, т.е. имеет место внутренняя положительная обратная связь, при которой роль тока $I_{oc}$ обмотки обратной связи выполняет постоянная составляющая тока нагрузки $I_н$. Коэффициент усиления по мощности такого усилителя весьма высок, так как большая часть мощности, необходимой для подмагничивания сердечников, потребляется из цепи переменного тока, и ток $I_у$ в обмотках управления может быть существенно уменьшен. Магнитные усилители с внутренней обратной связью используют в качестве регуляторов системы возбуждения тяговых генераторов на тепловозах 2М62, 2ТЭ10 и ТЭП60. При необходимости регулирования электрических установок большой мощности применяют трехфазные магнитные усилители.

*Трансформаторы постоянного тока* (ТПТ) служат для измерения тока тяговых электродвигателей и подачи на управляющую обмотку амплистата сигнала, пропорционального току тягового генератора. Трансформатор ТПТ состоит из двух тороидальных сердечников из железоникелевого сплава, на каждом из которых намотана рабочая обмотка. Рабочие обмотки имеют встречно-последовательное соединение. Управляющей обмоткой служат силовые кабели, пропущенные через центральное отверстие трансформатора. Принцип работы трансформатора постоянного тока такой же, как и магнитного усилителя без обратной связи. Индуктивное сопротивление рабочих обмоток изменяется под влиянием подмагничивания обмотки управления (на тепловозах управляющей обмоткой являются силовые кабели, по которым протекает ток тяговых электродвигателей). При увеличении тока тяговых электродвигателей степень насыщения сердечников увеличивается, индуктивное сопротивление рабочей обмотки уменьшается, а ток в рабочей обмотке трансформатора увеличивается, т.е. ток в рабочей обмотке трансформатора постоянного тока пропорционален току тяговых электродвигателей. Трансформаторы ТПТ-23 и -24 отличаются от трансформатора ТПТ-10 тем, что для снижения влияния помех, создаваемых посторонними сильноточными кабелями и стальными массами, рабочая обмотка выполнена в виде четырех параллельно соединенных секций. Параметры трансформаторов постоянного тока, применяемых на тепловозах, приведены ниже:

| Трансформатор | ТПТ-10 | ТПТ-23 | ТПТ-24 |
|---|---|---|---|
| Максимальный измеряемый ток, А | 2390 | 1300 | 2700 |
| Напряжение питания рабочей цепи, В | 15...50 | 15...110 | 15...110 |
| Частота питания рабочей цепи, Гц | 45...133 | 45...200 | 45...200 |
| Ток длительного режима рабочей цепи, А | 2,57 | 4,5 | 2,1 |
| Сопротивление нагрузки, Ом | 6 | 25 | 25 |

Трансформаторы постоянного напряжения (ТПН) служат для измерения напряжения тягового генератора. Параметры трансформаторов постоянного напряжения, применяемых на тепловозах, приведены ниже:

| Трансформатор | ТПН-13А | ТПН-4 |
|---|---|---|
| Максимальный измеряемый ток, А | 750 | 750 |
| Напряжение питания рабочей цепи, В | 30 | 55 |
| Частота питания рабочей цепи, Гц | 45...133 | 45...200 |
| Ток длительного режима рабочей цепи, А | 2,5 | 1,1 |
| Сопротивление нагрузки, Ом | 5 | 28 |

Трансформатор постоянного напряжения состоит из двух тороидальных сердечников с рабочей обмоткой. Управляющая обмотка намотана на оба сердечника. Принцип работы трансформатора постоянного напряжения основан на изменении индуктивного сопротивления рабочих обмоток под влиянием подмагничивания обмотки управления. При увеличении напряжения тягового генератора увеличиваются ток обмотки управления и степень насыщения сердечников, индуктивное сопротивление рабочих обмоток уменьшается, а ток в рабочих обмотках увеличивается. Следовательно, ток в рабочей цепи

трансформатора постоянного напряжения пропорционален напряжению тягового генератора. *Амплистат* возбуждения регулирует ток обмотки возбуждения возбудителя в зависимости от тока нагрузки и напряжения тягового генератора, частоты вращения коленчатого вала дизеля и мощности дизель-генератора. Амплистат АВ-3А представляет собой магнитный усилитель с внутренней обратной связью и питанием от источника переменного напряжения. Сердечник амплистата набран из П-образных пластин холоднокатаной электротехнической стали и стянут угольниками. На каждом сердечнике располагается по одной рабочей обмотке. Четыре обмотки управления – управляющая, задающая, регулировочная и стабилизирующая – охватывают оба сердечника. Параметры амплистата АВ-3А приведены ниже:

| | |
|---|---|
| Напряжение питания, В | 60 |
| Напряжение максимального выхода, В | 30 |
| Ток длительного режима, А | 8,5 |
| Ток минимального выхода, А | 0,6 |
| Частота напряжения питания, Гц | 133 |
| Сопротивление нагрузки, Ом | 6 |

Задающая обмотка получает питание от бесконтактного тахометрического блока и создает положительную МДС, которая пропорциональна частоте вращения коленчатого вала дизеля. Таким образом, осуществляется автоматическое управление тяговым генератором по частоте вращения коленчатого вала дизеля. Управляющая обмотка получает питание через селективный узел от цепей рабочих обмоток трансформатора постоянного тока и трансформатора постоянного напряжения. С помощью этой обмотки формируется сигнал о фактической мощности тягового генератора. Регулировочная обмотка служит для дополнительного автоматического регулирования мощности дизель-генератора. В стабилизирующей обмотке протекает ток стабилизирующего трансформатора, который оказывает влияние на работу амплистата в переходных режимах, например при изменении позиции контроллера машиниста. В зависимости от изменения напряжения возбудителя МДС стабилизирующей обмотки увеличивает или уменьшает подмагничивание амплистата.

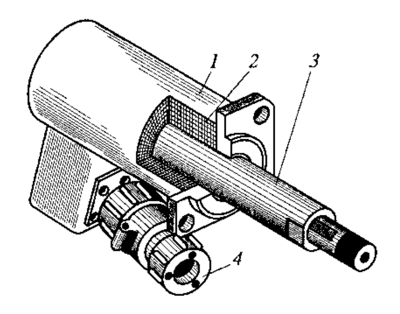



Рис. 15.10. Индуктивный датчик ИД-42.
1 – корпус; 2 – катушка; 3 – сердечник; 4 – штепсельный разъем.

Индуктивный датчик служит для изменения тока в регулировочной обмотке амплистата. На тепловозах 2М62 и 2ТЭ10 применяется индуктивный датчик ИД-10, а на тепловозах 2ТЭ116 – ИД-20 или -3. Эти датчики отличаются особенностями крепления и величиной полного сопротивления. Параметры индуктивных датчиков приведены ниже:

| | ИД-10 | ИД-31 | ИД-20 | ИД-32 |
|---|---|---|---|---|
| Напряжение, В | 10 | 10 | 17 | 17 |
| Длительный ток, А | 1,8 | 0,26 | 1,6 | 0,26 |
| Полное сопротивление, Ом | | | | |
| max | 70 | 550 | 70 | 550 |
| min | 55 | 65 | 62 | 65 |
| Ход якоря, мм | 65 | 65 | 65 | 65 |

Индуктивный датчик (рис. 15.10) состоит из магнитопровода, образованного корпусом 1 и сердечником 3. В магнитопровод помещена катушка 2, намотанная на прессованный каркас. Выводы катушки припаяны к контактам штепсельного разъема 4. Сердечник 3 соединен со штоком сервомотора регулятора мощности объединенного регулятора. При увеличении нагрузки дизеля поршень сервомотора перемещается так, что сердечник индуктивного датчика вдвигается в катушку. В результате этого полное сопротивление индуктивного датчика увеличивается, и ток в цепи регулировочной обмотки амплистата уменьшается. При уменьшении нагрузки сердечник выдвигается из катушки, полное сопротивление индуктивного датчика уменьшается, а ток регулировочной обмотки амплистата увеличивается. Изменение тока регулировочной обмотки зависит не от позиции контроллера машиниста, а от положения сердечника в катушке.

Контрольные вопросы

1. В чем преимущество тяговых трансформаторов с регулированием напряжения на высшей стороне?
2. Для чего нужны сглаживающие реакторы? Почему их нет на тепловозах?
3. Какие функции выполняют переходные реакторы?
4. Объясните работу простого магнитного усилителя.
5. В чем заключаются особенности включения обмоток магнитного усилителя с внутренней обратной связью?
6. Поясните порядок измерения тока и напряжения с использованием простых магнитных усилителей.
7. Какие функции выполняют обмотки управления амплистата?
8. Укажите назначение индуктивного датчика.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

*Таблица П. 1. Провод и кабели, используемые на подвижном составе*

| Марка | Наименование | Область применения |
|---|---|---|
| ППСРВМ | Провод для подвижного состава с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной морозостойкой оболочке. | Для монтажа в местах ограниченного перемещения проводов, присоединения к подвижным токоприемникам и фиксированного монтажа при воздействии смазочных масел и дизельного топлива. |
| ППСРН | Провод для подвижного состава с резиновой изоляцией в маслостойкой, не распространяющей горения резиновой оболочке. | Для фиксированного монтажа при воздействии смазочных масел и дизельного топлива. |
| ППСВ | Провод для подвижного состава с поливинилхлоридной изоляцией | Для фиксированного монтажа при воздействии смазочных масел и дизельного топлива. |
| БПВЛ | Провод с изоляцией из поливинилхлоридного пластика в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, лакированный для бортовой сети. | Для монтажа аппаратуры электрической бортовой сети. |
| БПВЛЭ | То же, экранированный. | Для монтажа аппаратуры электрической бортовой сети, когда требуется защита от радиопомех. |
| МГШВ | Провод монтажный с изоляцией из двух слоев триацетатного шелка и слоя поливинилхлоридного пластика. | Для внутриприборного и межприборного монтажа электрических устройств. |

| Марка | Наименование | Область применения |
|---|---|---|
| МГВ | Провод монтажный с поливинилхлоридной Изоляцией. | Для фиксированного монтажа цепей слаботочной аппаратуры и электрооборудования. |
| КПСРВМ | Кабель для подвижного состава с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной морозостойкой оболочке. | Для монтажа в местах ограниченного перемещения кабелей, присоединения к подвижным токоприемникам и фиксированного монтажа при воздействии смазочных масел и дизельного топлива. |
| КПСРМ | Кабель для подвижного состава с резиновой изоляцией в резиновой морозостойкой оболочке. | Для присоединения к подвижным токоприемникам, монтажа в местах ограниченного перемещения кабелей и для фиксированного монтажа при отсутствии воздействия смазочных масел и дизельного топлива. |

*Таблица П. 2. Щетки для электрических машин (ГОСТ 12232 – 89)*

| Марка щетки | Давление на щетку, Н | Тип машины |
|---|---|---|
| Тяговые электродвигатели | | |
| ЭГ*-61 | 42...48 | ЭД108А, -118А, -118Б, -120А, -121А, -125А, -126, -127, -114 |
| ЭГ-2А | 47...50 | НБ-404А, -431А, ДК-100, -406А, -409Б |
| Вспомогательные машины | | |
| ЭГ-14 | 20...36 | А-706А |
| ЭГ-8 | 32...48 | А-706А |
| ЭГ-14 | 20...36 | МВТ-25/9 + МВГ-25/11 |
| ЭГ-4 | 20...25 | А-710, ВС-650В |
| ЭГ-14 | 20...36 | В-600А |
| ЭГ-14 | 20...25 | ГП-405А |
| ЭГ-8 | 32...48 | ВС-652 |
| Генераторы постоянного тока | | |
| ЭГ-14 | 20...25 | ГП-300Б, -311Б, -311В, -319 |
| Генераторы переменного тока | | |
| ЭГ-4 | 20...25 | ГС-501А, А-713, -714 |
| Стратер-генераторы | | |
| ЭГ-71 | 26...30 | СТГ-7 |
| ЭГ-14 | 20...25 | ПСГ, 2ПСГ |
| Электростартеры | | |
| МГ**-4С | 50...60<br>43...55 | ЭС-2,<br>СТ-721, -722 |
| Электродвигатели | | |
| ЭГ-71 | 26...30 | ЭКТ-3, ЭКТ-5 |
| ЭГ-14 | 20...25 | 2П2К, П2К |
| Электродвигатели серии П | | |
| ЭГ-4 | 15...20 | П-11, -21, -22, -41, -42, «72 |
| ЭГ-4Э | 15...20 | П-11М |
| ЭГ-74 | 20...25 | П-21М, -22М, -32М, -42М, -51М, -61М, -62 |

* Электрографитная щетка. ** Металлографитная щетка.

*Таблица П. 3. Сталь электротехническая тонколистовая*
*(ГОСТ 21427.0-83, ГОСТ 21427.1-83, ГОСТ 21427.2-83, ГОСТ 21427.3-83)*

| Марка стали | Толщина листа, мм |
|---|---|
| 1211 (Э11), 1212(Э12) | 0,5; 1,0 |
| 1213(Э13), 1311 (Э21), 1312(Э22), | 0,5 |
| 1313, 1411 (Э31), 1412 (Э32), 1511 (Э41), 1512 (Э42), 1513(Э43), 1514 (Э43А), | 0,35; 0,5 |
| 1521 (Э44) | 0,1; 0,2; 0,35 |
| 1561 (Э45), 1562 (Э46), 1571 (Э47), 1572 (Э48) | 0,2; 0,35 |
| 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211 (Э1300), 2212, 2311, 2312, 2411 (Э3100) | 0,5 |
| 3411 (Э310), 3412(Э320), 3413(Э330) | 0,5 |
| 3414(Э330А) | 0,35 |
| 3415, 3416 | 0,2 |

Примечания: 1. Цифры в марках электротехнической стали обозначают:
• первая цифра (1, 2, 3) – класс по структурному состоянию и виду прокатки стали: 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – анизотропная с ребровой структурой;
• вторая цифра (1 – 5) – содержание кремния в стали;
• третья цифра (1, 2, 6, 7) – группа по основной нормируемой характеристике (удельные потери или магнитная индукция).
2. В скобках указано соответствие марок стали по ГОСТ 21427.1 – 75.

*Таблица П. 4. Электроизоляционные лаки, эмали, смолы*

| Наименование и характеристика | Разбавитель | Назначение |
|---|---|---|
| Лак битумно-масляный горячей сушки, черный, немаслостойкий | Толуол, ксилол, сольвент каменноугольный или смесь одного из растворителей с уайт-спиритом | Пропитка якорей машин и аппаратов классов А, Е, В. Пропитка якорных катушек, хлопчатобумажных, стеклянных и асбестовых лент |
| Лак смоляной горячей сушки, коричневый, маслостойкий | Ксилол | Пропитка якорей и других обмоток класса В |
| Лак бакелитовый горячей сушки | Спирт | Лакировка деталей из слоистых пластиков |
| Лак кремнийорганический горячей сушки | Ксилол | Пропитка якорей. Пропитка и промазка якорных катушек, обмоток возбуждения |
| Лак глифталевый горячей сушки | Толуол, ксилол, сольвент каменноугольный или смесь одного из растворителей с уайт-спиритом (1:1) | Пропитка якорей, якорных катушек, тканей, бумаги и прочее класса В |
| Лак эпоксидный | Толуол, этилцеллюлоза | Пропитка обмоток электрических машин класса F |
| Лак глифталевый горячей сушки | Толуол, ксилол, смесь уайт-спирита с толуолом или ксилолом | Пропитка обмоток машин. Покрытие деталей из слоистых пластиков класса В |
| Лак глифталевый горячей сушки | Ксилол, бензин, толуол | Покрытие концевых листов сердечников электрических машин |

*Продолжение таблицы, П. 4*

| Наименование и характеристика | Разбавитель | Назначение |
|---|---|---|
| Лак глифталевый воздушной сушки | Спирт, толуол, ацетон | Пропитка, промазка асбестовой изоляции полюсных катушек, промазка миканитовых заготовок при изготовлении коллекторных манжет |
| Лак глифталевый цементирующий воздушной сушки | Смесь спирта с толуолом, ксилол | Клейка и цементация полюсных катушек с изоляцией из асбестовой бумаги |
| Лак маслянобитумный быстрой воздушной сушки, влагостойкий | Сольвент каменноугольный, толуол, ксилол, их смеси с уайт-спиритом | Наружная окраска тяговых электродвигателей. Покрытие пропитанных катушек и изоляционных деталей |
| Эмаль глифталевая воздушной сушки, серого цвета, маслостойкая | Сольвент, ксилол, толуол, смесь ксилола с бензином (1:1) | Покрытие пропитанных обмоток и изоляционных деталей класса В |
| Эмаль глифталевая горячей сушки, серого цвета, масло-, дуго- и теплостойкая | Тоже | Тоже |
| Эмаль кремнийорганическая горячей сушки | Толуол | Покрытие пропитанных обмоток и изоляции деталей класса Н |
| Эмаль кремнийорганическая холодной сушки | Толуол | Для ремонта и отделочных покрытий катушек и других узлов электрических машин и аппаратов класса Н |
| Эмаль эпоксидная горячей сушки | Этилцеллюлоза | Покрытие пропитанных обмоток якоря электрических машин класса F |

*Таблица П.5. Миканиты, применяемые в электрических машинах подвижного состава, и их характеристики.*

| Вид миканита | Марка миканита | Толщина листа, мм. | Характеристики слюды | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Минералогическая разновидность | Площадь чешуек, мм$^2$ | Сорт | Класс изоляции |
| Гибкий | ГМС | 0,3; 0,5 | Мусковит | 6 | 2 | В |
| | ГФК | 0,3; 0,5 | Флагопит, нагревостойкая | 6 | 2 | Н |
| | ГФЧ-ББ | 0,2 | Флагопит, обыкновенная | 10 | 2 | А, В |
| Прокладочный | ПСГ | 0,5; 1,0 | Смесь мусковит и флагопит обыкновенная | 10 | 2 | В |
| | ПФК | 0,15 | Флагопит, нагревостойкая | 6 | 2 | Н |
| | ПФП | 0,5; 1,0 | Тоже | 6 | 3 | F |

*Окончание табл. П.5*

| Вид миканита | Марка миканита | Толщина листа, мм | Характеристики слюды | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Минералогическая разновидность | Площадь чешуек, мм$^2$ | Сорт | Класс изоляции |
| Формовочный | ФМГ, ФМГА | 0,3 | Флагопит, обыкновенная | 20 | 1 | B |
| | | 0,3; 0,5 | Тоже | 6 | 2 | B |
| | ФФГ, ФФГА | 0,3; 0,5 | Флагопит, нагревостойкая | 10 | 1 | H |
| | ФФК, ФФКА | 0,3; 0,5 | То же | 20 | 1 | H |
| | ФФП | 0,3 | То же | 10...20 | 2 | F и H |
| Коллекторный | КФШ | 0,9; 1,0 | Флагопит, обыкновенная | 20 | 1 | B |
| | КФГ | 1,2; 1,5 | То же | 20 | 2 | B |
| | КФП-1 | 0,8; 0,9 | Флагопит, нагревостойкая | 20 | 1 | F |
| | КФП | 1,0; 1,2 | Тоже | 10...20 | 2 | F |
| | КФШ-1 | 1,3; 1,5 | То же | 20 | 1 | F |

*Таблица П.6. Микаленты, применяемые в тяговых электрических машинах подвижного состава*

| Марка ленты | Толщина, мм. | Площадь чешуек слюды, мм$^2$ | Класс изоляции | Рекомендуемая область применения |
|---|---|---|---|---|
| ЛФЧ-ББ | 0,1 | 30 | B | Витковая и корпусная изоляция катушек якоря электрических машин |
| ЛФС-ББ | 0,13 | 20 | B | Корпусная изоляция катушек якоря машин постоянного тока |
| ЛФС-ТТ, ЛФЭ-ТТ | 0,1 | 40 | F | Витковая и корпусная изоляция катушек якоря и уравнителей машин постоянного тока |
| ЛФС-ТТ, ЛФЭ-ТТ | 0,13 | 30 | F | Корпусная изоляция катушек якоря машин постоянного тока |
| ЛФС-ТТ | 0,17 | 20 | F | Изоляция полюсных катушек |
| ЛФЭ-ТТ | 0,17 | 30 | F | Тоже |
| ЛФК-ТТ | 0,1 | 40 | H | Витковая и корпусная изоляция обмоток электрических машин |
| ЛФК-ТТ | 0,13 | 30 | H | Тоже |

Примечания: 1. Микалента марок ЛФС-ТТ и ЛФЭ-ТТ применяется в обмотках, пропитываемых в светлых лаках, а марки ЛФЧ-ББ – в асфальтовых лаках и компаундах.
2. В качестве заменителя микаленты на слюде флагопит применяется лента на слюде мусковит.
3. Микалента ЛФЭ-ТТ выпускается согласно ТУ 16-503.028–75.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: Учебник для вузов ж. -д. транспорта. – М.: Транспорт, 1999- – 464 с.
2. Быстрицкий Х.Я., Дубровский 3. М., Ребрик Б. Н. Устройство и работа электровозов переменного тока. – М.: Транспорт, 1973. – 464 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Дайлидко А, А. Электрические машины тягового подвижного состава: Учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта. – М.: Желдор-издат, 2002. – 404 с.
5. Дубровский 3. М, Попов Е. И., Тушканов Б. А. Грузовые электровозы переменного тока. – М.: Транспорт, 1998. – 350 с.
6. Захарченко Д.Д., Ротанов М.JI. Тяговые электрические машины. – М.: Транспорт, 1991. – 344 с.
7. Калинин В. Н. Электровозы и электропоезда. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
8. Пиотровский Л. М. Электрические машины. –Л.: Энергия, 1972. – 382 с.
9. Тепловоз 2ТЭ116. – М.: Транспорт, 1996. – 336 с.
10. Электрические машины, электрическое оборудования тепловозов: Справочник. – М.: Транспорт, 1981. – 265 с.
11. Электровоз ВЛ80. – М.: Транспорт, 1982. – 624 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание.

Грищенко Александр Васильевич.
Стрекопытов Виктор Васильевич.
Электрические машины и преобразователи подвижного состава.

Редактор Т. Г.Хохлова
Технический редактор И. И. Горбачева. Компьютерная верстка: Н. В. Протасова.
Корректоры Е. В.Соловьева, С. Ю.Свиридова.

Диапозитивы предоставлены издательством.
Изд. № А-1158-1 Подписано в печать 25.04.2005. Формат 60x90/16 Гарнитура «Таймс».
Бумага тип № 2. Печать офсетная. Усл печ. л. 20,0 Тираж 4000 экз. Заказ № 14807
Издательский центр «Академия».
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99 02 953 Д 004796 07 04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 360 Тел./факс. (095)330-1092, 334-8337.
Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфический комбинат». 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.